CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DANIELLE STEFANE GUALBERTO FERNANDES

Avaliação da aderência entre barras finas de aço e concretos de diferentes classes de resistência

Dissertação

Departamento de Engenharia Civil

Belo Horizonte, março de 2018

PPGEC – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil

DANIELLE STEFANE GUALBERTO FERNANDES

AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA ENTRE BARRAS FINAS DE AÇO E CONCRETOS DE DIFERENTES CLASSES DE RESISTÊNCIA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Profª. Drª. Eliene P. Carvalho

Belo Horizonte, março de 2018

Fernandes, Danielle Stefane Gualberto
F363a Avaliação da aderência entre barras finas de aço e concretos de diferentes classes de resistência. / Danielle Stefane Gualberto Fernandes. – – Belo Horizonte, 2018.
ix, 76 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 2018.
Orientador: Profa. Dra. Eliene Pires Carvalho.

Bibliografia

1. Concreto de Alta Resistência. 2. Ancoragem (Engenharia de Estruturas). 3. Ancoragem por Aderência. I. Carvalho, Eliene Pires. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título

CDD 693.54

Elaboração da ficha catalográfica pela Bibliotecária Elisângela Gonçalves Barbieri CRB-6: 2624 / CEFET-MG

DANIELLE STEFANE GUALBERTO FERNANDES

AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA ENTRE BARRAS FINAS DE AÇO E CONCRETOS DE DIFERENTES CLASSES DE RESISTÊNCIA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Prof. Dra. Eliene Pires Carvalho
Orientadora
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Prof. Dr. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco
Departamento de Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo, UFMG

Prof. Dr. Cláudio José Martins
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Prof. Dra. Renata Gomes Lanna da Silva
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Belo Horizonte, 06 de Março de 2018

A Deus

Aos meus pais e irmãos

Aos meus queridos amigos

Agradecimentos

Agradeço a Deus, por sempre me iluminar e me dar forças para alcançar os meus objetivos.

Aos meus pais, Geraldo e Fátima, por todo amor, apoio, dedicação e ensinamentos de vida.

À minha irmã, pelo companheirismo e pela amizade e ao meu irmão, que mesmo distante se fez presente com a lembrança de suas piadas e bom humor.

À tia Ione e Maria, pelas conversas diárias e amizade.

Ao Thiago Porto, pelo incentivo dado para iniciar o mestrado e pelos ensinamentos e apoio durante todo o processo.

Às minhas grandes amigas, Paloma, Danis e Gláucia, pelas conversas, pela amizade e pela força em todos os momentos.

À professora Eliene, pela orientação, pelos ensinamentos voltados à dissertação e ao caminho da docência, pela disponibilidade e pela eficiência em sempre responder às minhas dúvidas e questionamentos.

Aos professores Paulo e Renata, que participaram da banca de qualificação e contribuíram para o enriquecimento deste trabalho.

Aos meus amigos de mestrado, Marcela e Pedro, e ao aluno de graduação, Guilherme, pela ajuda e boa vontade nas etapas de realização dos ensaios.

Ao CEFET-MG, pela disponibilidade dos laboratórios e ao CEFET de Divinópolis, pela boa vontade no transporte do material de doação até Belo Horizonte.

Aos funcionários dos laboratórios do CEFET, em especial ao Ivan, pelo empenho e ajuda nos ensaios.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela concessão da bolsa durante o período de mestrado.

Às empresas Belgo Bekaert Arames, pelas barras cedidas para pesquisa, à Betonmix, pela doação de brita, à Lafarge-Holcim, pelo cimento doado para realização dos ensaios e à MC-Bauchemie, pelo aditivo superplastificante doado.

A todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Muito obrigada!

Resumo

A aderência aço-concreto é um mecanismo de interação que possibilita a transferência de esforços das barras de aço para o concreto. Ela se mostra como uma das propriedades fundamentais em elementos de concreto armado. Para avaliação da aderência aço-concreto, os ensaios mais utilizados na literatura são: ensaios de arrancamento, ensaios de vigas rotuladas e ensaios de barras confinadas. Estudos anteriores apontam que o ensaio de barras confinadas mostra-se inadequado para barras finas de aço e que o ensaio de vigas rotuladas apresenta difícil execução. Já o ensaio de arrancamento mostra-se como o mais simples e utilizado dos métodos para estudo do comportamento da aderência. No entanto, poucas pesquisas adotaram os ensaios de arrancamento para barras finas de aço (diâmetros de até 10,0 mm), que são normalmente utilizadas na construção civil, devido ao emprego cada vez maior do concreto de alta resistência e de elementos esbeltos. A norma brasileira ABNT-NBR 7480 (2007) requer um ensaio de aderência para controle de qualidade das barras. Portanto, atualmente há uma preocupação com os resultados dos ensaios para avaliar a aderência aço-concreto, principalmente para barras finas de aço. Dessa forma, o principal objetivo deste trabalho foi o estudo da aderência entre barras nervuradas finas (6,3 mm, 8,0 mm e 10,0 mm) e concretos convencional e de alta resistência (30 MPa e 60 MPa). Procurou-se, com esta pesquisa, contribuir para compreender melhor o comportamento da aderência aço-concreto para barras finas de aço e fornecer informações importantes para a definição de padrões futuros para ensaios de aderência. Para tanto, foram realizados ensaios de arrancamento de acordo com a EN:10080 (2005), adotando-se um comprimento de ancoragem modificado de 10 vezes o diâmetro da barra. Os resultados indicaram que a tensão de aderência aumenta com o aumento da resistência à compressão do concreto. Para concreto de alta resistência, concluiu-se que o diâmetro da barra não teria influência na tensão última de aderência. Quanto ao comprimento de ancoragem, são necessários mais ensaios para conclusões a respeito desse parâmetro. Em relação ao coeficiente de conformação superficial (η), os resultados apontaram valores próximos, independente do diâmetro da barra ou da classe de concreto.

Palavras-Chave

Aderência, Barras finas, Comprimento de ancoragem, Concreto de alta resistência, Ensaio de arrancamento.

Abstract

The steel-concrete bond is an interaction mechanism that enables force transfer of steel bars to concrete. It is one of the fundamental properties of reinforced concrete elements. Most of the tests used in the literature to evaluate the steel-concrete bond are: pull-out tests, beam tests and confined bars tests. Previous studies indicated that confined bars test is inappropriate for thin steel bars and beam test is difficult to perform. The pull-out test is shown as the simplest and most common of the tests used for bond behavior study. However, there are few researches that have used the pull-out tests for thin steel bars (diameters up to 10.0 mm), which are commonly used in civil construction due to the increasing use of high-strength concrete and slender elements. The Brazilian standard ABNT-NBR 7480 (2007) requires a bond test for the rebars quality control. Therefore, there is currently a concern about the results from tests to evaluate the steel-concrete bond, especially for thin steel rebars. The main objective of this research was the study of the bond stress between thin deformed bars (6.3 mm, 8.0 mm and 10.0 mm) and conventional and high strength concrete (30 MPa and 60 MPa). The aim of this research was to contribute to a better understanding of the steel-concrete bond behavior for thin steel bars and to provide important information for the definition of future standards for bond tests. For that, pull-out tests were performed according to EN:10080 (2005), adopting a modified anchorage length equal to 10 times the bar diameter. The results indicated that the bond strength increased with the increase of concrete compressive strength. For high strength concrete, it was concluded that the diameter of the bar would have no influence on the ultimate bond strength. Regarding to the anchorage length, further tests are required for conclusions about this parameter. About the surface conformation coefficient (η), the results indicated close values, regardless of bar diameter or concrete class.

Keywords

Bond, Thin rebars, Anchorage length, High strength concrete, Pull-out test.

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Modelo de corpo de prova segundo a EN:10080 2
Figura 1.2 - Corpo de prova após o ensaio segundo a NBR 7477 3
Figura 2.1 - Rupturas por arrancamento (a) e por fendilhamento (b) 7
Figura 2.2 - Modelo do corpo de prova do ensaio de tirantes 11
Figura 2.3 - Modelo do corpo de prova do ensaio de vigas rotuladas 11
Figura 2.4 - Modelo do corpo de prova recomendado por norma..... 12
Figura 2.5 - Esquema do ensaio de arrancamento 13
Figura 2.6 - Corpos de prova para ensaio de arrancamento 14
Figura 2.7 - Gráfico tensão *versus* deslizamento segundo o Model Code..... 16
Figura 2.8 - Formação de espaços vazios ou poros sob barras horizontais 19
Figura 3.1 - Ensaio de compressão uniaxial 30
Figura 3.2 - Ensaio de tração por compressão diametral 30
Figura 3.3 - Ensaio de tração da barra de aço 31
Figura 3.4 - Fôrma de madeira para CP cúbico 33
Figura 3.5 - Detalhe esquemático do CP cúbico 33
Figura 3.6 - Isolamento do trecho sem aderência com tubo de PVC rígido..... 33
Figura 3.7 - Fôrmas de madeira antes e após a concretagem 34
Figura 3.8 - Detalhe do transdutor de deslocamento 35
Figura 3.9 - Máquina universal com suporte de aço para ensaio 35
Figura 4.1 - Curva granulométrica da areia utilizada e limites da NBR 7211..... 40
Figura 4.2 - Curva granulométrica da brita utilizada e limites da NBR 7211..... 41
Figura 4.3 - Gráfico tensão *versus* deslizamento - Classe C30 - ϕ 6,3 mm 43
Figura 4.4 - Gráfico tensão *versus* deslizamento - Classe C30 - ϕ 8,0 mm 44
Figura 4.5 - Gráfico tensão *versus* deslizamento - Classe C30 - ϕ 10,0 mm 44
Figura 4.6 - Gráfico tensão *versus* deslizamento - Classe C60 - ϕ 6,3 mm 46
Figura 4.7 - Gráfico tensão *versus* deslizamento - Classe C60 - ϕ 8,0 mm 46
Figura 4.8 - Gráfico tensão *versus* deslizamento - Classe C60 - ϕ 10,0 mm 47
Figura 4.9 - Gráfico resistência máx. de aderência *versus* diâmetro da barra.... 48
Figura 4.10 - Coeficientes de conformação superficial (η) obtidos nos ensaios . 50

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Coeficiente de conformação superficial (η)..... 3
Tabela 2.1 - Fatores que interferem na aderência aço-concreto..... 7
Tabela 3.1 - Traço utilizado para o concreto da classe C30..... 27
Tabela 3.2 - Traço utilizado para o concreto da classe C60..... 27
Tabela 3.3 - Planejamento dos ensaios de arrancamento 32
Tabela 3.4 - Equações normativas para cálculo da tensão de aderência..... 38
Tabela 4.1 - Composição granulométrica da areia em estudo 39
Tabela 4.2 - Resultado do ensaio para determinação da massa específica da areia 40
Tabela 4.3 - Resultados da caracterização do concreto..... 41
Tabela 4.4 - Resultado da caracterização das barras de aço CA-50..... 42
Tabela 4.5 - Resultados para Ensaios de Arrancamento - Concreto C30 43
Tabela 4.6 - Resultados para Ensaios de Arrancamento - Concreto C60 45
Tabela 4.7 - Coeficiente de conformação superficial das barras (η)..... 50
Tabela 4.8 - Resultados dos ensaios de França (2010) - 5ϕ 51
Tabela 4.9 - Resultados dos ensaios de arrancamento - Classe C30 - 10ϕ 51
Tabela 4.10 - Comparação entre valores experimentais e teóricos..... 53

Tabela A.1 - Determinação de MS_B e MS_W..... 61
Tabela A.2 - Resumo do teste ANOVA – Classe C30 e ϕ= 6,3mm e 8,0mm..... 62
Tabela A.3 - Resumo do teste ANOVA – Classe C30 e ϕ= 6,3mm e 10,0mm.... 63
Tabela A.4 - Resumo do teste ANOVA – Classe C30 e ϕ= 8,0mm e 10,0mm.... 63
Tabela A.5 - Resumo do teste ANOVA – Classe C60 e ϕ= 6,3mm e 8,0mm..... 64
Tabela A.6 - Resumo do teste ANOVA – Classe C60 e ϕ= 6,3mm e 10,0mm.... 64
Tabela A.7 - Resumo do teste ANOVA – Classe C60 e ϕ= 8,0mm e 10,0mm.... 65
Tabela A.8 - Resumo do teste ANOVA – Barras de 6,3mm..... 66
Tabela A.9 - Resumo do teste ANOVA – Barras de 8,0mm..... 67
Tabela A.10 - Resumo do teste ANOVA – Barras de 10,0mm..... 67
Tabela A.11 - Dados da amostra – Classe C30 e ϕ= 6,3mm 70
Tabela A.12 - Cálculo do parâmetro b..... 70

Sumário

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. OBJETIVOS 5
1.1.1. Objetivo geral 5
1.1.2. Objetivos específicos 5

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 6

2.1. ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO 6
2.1.1. Fatores que interferem na aderência 7
2.1.2. Ensaios de aderência 10
2.2. EQUAÇÕES QUE RELACIONAM A RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À RESISTÊNCIA DO CONCRETO 15
2.2.1. Resistência de aderência segundo o Model Code (2010) 15
2.2.2. Resistência de aderência segundo a ABNT-NBR 6118 (2014) 16
2.3. ESTUDOS SOBRE A ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO 18

3. MATERIAIS E MÉTODOS 27

3.1. MATERIAIS 27
3.1.1. Concreto 27
3.1.2. Barras de aço 28
3.2. MÉTODOS 28
3.2.1. Caracterização dos agregados 28
3.2.2. Caracterização do concreto 29
3.2.3. Caracterização das barras de aço 30
3.2.4. Ensaios de arrancamento 31

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS 39

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 39
4.1.1. Agregados 39
4.1.2. Concreto 41
4.1.3. Barras de aço 42
4.2. ENSAIOS DE ARRANCAMENTO 42
4.2.1. Resistência de aderência *versus* diâmetro das barras 48
4.2.2. Cálculo do coeficiente de conformação superficial (η) considerando-se os ensaios de arrancamento 49
4.2.3. Análise do comprimento de ancoragem adotado nos ensaios 51
4.2.4. Comparação entre valores experimentais e teóricos da tensão de aderência 52

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 54

6. REFERÊNCIAS 56

APÊNDICE A - TESTE ANOVA UNIDIRECIONAL 60

APÊNDICE B - TESTE DE NORMALIDADE DE *SHAPIRO-WILK* 69

ANEXO A - DISTRIBUIÇÃO T 74

ANEXO B - DISTRIBUIÇÃO F 75

ANEXO C - TESTE DE *SHAPIRO-WILK* 76

1. Introdução

A utilização das estruturas em concreto armado mostra-se possível devido à propriedade de aderência entre os seus dois elementos: o aço e o concreto. Essa interação recebe a influência de vários fatores, mostrando-se, dessa forma, a grande relevância do estudo desses parâmetros para um melhor entendimento sobre a aderência, visando a segurança e a qualidade das estruturas em concreto armado.

Desde a década de 1940, diversos estudos acerca desse tema vêm sendo desenvolvidos, podendo-se mencionar alguns como o de Rehm (1968), Fernandes e El Debs (2000), Zhu *et al.* (2004), Almeida Filho *et al.* (2008), Valcuende e Parra (2009), Arel e Yazici (2012), Pop *et al.* (2013), Garcia-Taengua *et al.* (2016), Kaffetzakis e Papanicolaou (2016), Rosales *et al.* (2016), Shen *et al.* (2016), Al-Shannag e Charif (2017), Wardeh *et al.* (2017) e Zaini-Rijal e Rahman (2017). Alguns desses trabalhos, por meio de adições como sílica ativa, escória de alto forno granulada e cinzas volantes, abordaram o estudo da aderência em concretos de alta resistência. Outros abordaram os concretos auto adensáveis, a influência da inserção de fibras de aço, agregados leves ou reciclados. No entanto, todos eles utilizaram barras de diâmetros iguais ou superiores a 10,0 mm e comprimentos de ancoragem variados.

Atualmente, observa-se uma demanda crescente por barras de diâmetros inferiores no mercado, uma vez que o concreto de alta resistência e os elementos mais esbeltos vêm sendo cada vez mais utilizados devido ao avanço da tecnologia e das técnicas. Dessa forma, vê-se a necessidade de maiores pesquisas acerca da aderência entre essas barras e o concreto.

Entre os ensaios realizados para o estudo da aderência, tem-se o ensaio de arrancamento (*pull-out test*) como o de maior facilidade de execução, sendo indicado para definição da tensão de aderência. Esse ensaio é regulamentado pela EN:10080 (2005), sendo recomendada a utilização de corpos de prova cúbicos de dimensões iguais a 10 vezes o diâmetro da barra (10ϕ) (mínimo de 20 cm) e comprimento de ancoragem de 5ϕ, conforme a Fig. 1.1.

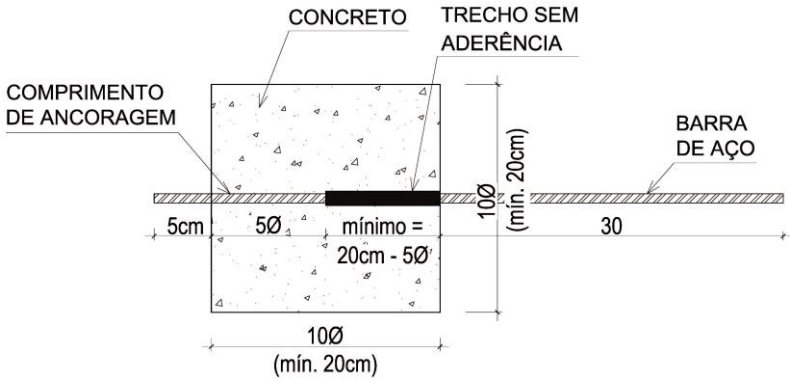


Figura 1.1 - Modelo de corpo de prova segundo a EN:10080 – Adaptado de EN:10080 (2005)

Poucos estudos como o de Barbosa (2001), França (2010) e o de Carvalho *et al.* (2017) abordaram barras de diâmetros iguais ou inferiores a 10,0 mm, com um comprimento de ancoragem de cinco vezes o diâmetro da barra (5ϕ). França (2010) e Carvalho *et al.* (2017) afirmam que a grande dispersão encontrada nos seus resultados pode ter sido causada pelo pequeno comprimento de ancoragem de 5ϕ, já que qualquer pequena interferência na interface aço-concreto poderia alterar significativamente a tensão de aderência, sugerindo maiores estudos em torno dessa variável. A variação nos comprimentos de ancoragem em corpos de prova para o ensaio de arrancamento pode ser um fator relevante e influenciar nos resultados de tensão de aderência.

Para que se possa verificar a qualidade das barras de aço empregadas nas estruturas em concreto armado, exige-se a realização de ensaios de aderência. Um parâmetro importante a ser obtido nesses ensaios refere-se à conformação superficial da barra, que é relacionada à altura das nervuras e espaçamento entre elas. Esse parâmetro mede indiretamente a capacidade de aderência da barra ao concreto, sendo maior para barras nervuradas e menor para barras lisas. A ABNT-NBR 7480 (2007) – "Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação" sugere os valores mínimos expressos na Tab. 1.1 para o coeficiente de conformação superficial das barras.

Por meio da Tab. 1.1, pode-se observar que a norma apresenta valores para o coeficiente η de acordo com o diâmetro da barra, sendo utilizado, para barras de diâmetros inferiores a 10,0 mm, um valor único igual a 1,0. Provavelmente, esse fato se deve ao número muito reduzido de trabalhos que abordem barras de

diâmetros inferiores. Dessa forma, tem-se, para barras de diferentes diâmetros e conformações superficiais, um mesmo coeficiente.

Tabela 1.1 - Coeficiente de conformação superficial (η)

ABNT-NBR 7480 (2007)		
Coeficiente de conformação superficial mínimo (η)		**Tipo de barra**
d < 10 mm	**$d \geq$ 10 mm**	
1,0	1,0	Barras lisas
1,0	1,2	Barras entalhadas CA-60
1,0	1,5	Barras nervuradas CA-50

Fonte: ABNT-NBR 7480, 2007.

Para obtenção do valor de η e comparação com o valor tabelado, a norma determina que seja realizado o ensaio de barras confinadas. Esse ensaio é regulamentado pela ABNT-NBR 7477 (1982) – "Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado" e consiste na aplicação de esforços de tração sobre uma barra de aço centralizada em um corpo de prova prismático até a formação de fissuras. Por meio da análise das características das fissuras geradas, determina-se o coeficiente de conformação superficial da barra ensaiada. Na Fig. 1.2, é apresentado um esquema do corpo de prova após o ensaio segundo a ABNT-NBR 7477 (1982).

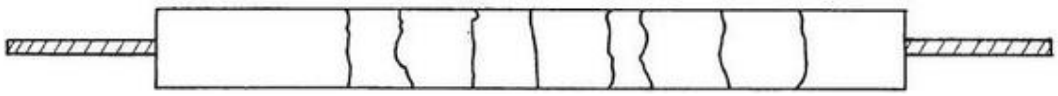


Figura 1.2 - Corpo de prova após o ensaio segundo a NBR 7477 – ABNT-NBR 7477 (1982)

No entanto, Carvalho *et al.* (2017) indicam que, possivelmente, o ensaio de barras confinadas não se mostra como o método mais adequado para a determinação do coeficiente de conformação superficial para as barras finas de aço. Os autores afirmam que, em geral, o número de fissuras encontradas nas seções transversais dos corpos de prova ensaiados foi menor que o mínimo prescrito pela ABNT-NBR 7477 (1982) (mais do que 5 fissuras) e os coeficientes

de conformação superficial calculados apresentaram valores inferiores ao mínimo exigido pela ABNT-NBR 7480 (2007) (η = 1,0).

A partir dos problemas mencionados, o Comitê Brasileiro de Siderurgia ABNT/CB-28 pela Comissão de Estudo de Metalografia e Ensaios (CE 28:000.05) tem realizado reuniões com o objetivo de determinar um ensaio de aderência padrão para as barras finas de aço, uma vez que o ensaio atual preconizado pela ABNT-NBR 7477 (1982) tem apresentado resultados duvidosos sobre a aderência de barras finas. Desde 2010, pesquisadores do CEFET-MG têm desenvolvido trabalhos para avaliar a metodologia proposta pela norma NBR 7477 e estudado outras metodologias de ensaios de aderência para barras finas. Entre as novas metodologias, pode-se citar as recomendações da EN:10080 (2005) que são: ensaios de vigas rotuladas e ensaios de arrancamento. Os resultados dos estudos desenvolvidos, como o de França (2010) e Carvalho *et al.* (2017), têm apresentado grande relevância, servindo de embasamento para as discussões dos membros do CB-28, do qual alguns professores do departamento fazem parte, juntamente com professores da UERJ e outros profissionais.

Dessa forma, propõe-se, neste trabalho, o estudo da aderência entre barras finas de aço (6,3 mm, 8,0 mm e 10,0 mm de diâmetro) e concretos de diferentes resistências à compressão (30 MPa e 60 MPa) por meio de ensaios de arrancamento. Visando reduzir a variabilidade encontrada nos resultados que utilizaram um comprimento de ancoragem de 5ϕ, esta pesquisa sugere a adoção de um comprimento de ancoragem modificado de dez vezes o diâmetro da barra (10ϕ).

Visto que a pesquisa experimental proporciona a análise da influência de determinados parâmetros e a obtenção de resultados significativos, pretende-se fornecer informações relevantes para o Comitê Brasileiro de Siderurgia, visando a regulamentação de um ensaio de arrancamento brasileiro.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo é apresentar resultados de resistência de aderência entre barras finas de aço com diferentes diâmetros (6,3 mm, 8,0 mm e 10,0 mm) e concretos de diferentes classes (C30 e C60), adotando-se um comprimento de ancoragem de 10ϕ nos ensaios de arrancamento.

1.1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- analisar a influência dos diâmetros das barras finas de aço na tensão última de aderência utilizando-se os resultados dos ensaios;
- analisar a interferência da resistência à compressão do concreto sobre a aderência a partir dos resultados experimentais;
- calcular o coeficiente de conformação superficial (η) para as barras finas de aço a partir dos resultados dos ensaios realizados, utilizando a equação proposta por Carvalho *et al.* (2017);
- realizar uma análise quanto ao comprimento de ancoragem adotado nos ensaios de arrancamento;
- comparar os resultados obtidos nos ensaios de arrancamento com os valores da tensão de aderência calculados segundo as equações propostas pela ABNT-NBR 6118 (2014) e pelo Model Code (2010).

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Aderência aço-concreto

Tastani e Pantazopoulou (2010) e Valcuende e Parra (2009) definem a aderência como um mecanismo de interação que possibilita a transferência de esforços das barras de aço para o concreto, assegurando a ação conjunta desses materiais.

Arel e Yazici (2012) e Kaffetzakis e Papanicolaou (2016) afirmam que a aderência é composta por três parcelas: a aderência por adesão, a aderência por atrito e a aderência mecânica. Barbosa (2001) aponta que a aderência por adesão resiste apenas a pequenos esforços, sendo facilmente rompida e dando origem à aderência por atrito, que ocorre na interface aço-concreto e depende do coeficiente de atrito entre esses materiais e da rugosidade da superfície da barra. A autora afirma que esses dois tipos de aderência são rompidos rapidamente, levando à transferência dos esforços por meio das irregularidades da barra, como nervuras ou saliências (aderência mecânica). No entanto, Fernandes e El Debs (2000) indicam que essa divisão é didática, uma vez que não é possível identificar cada componente de forma isolada.

A eficácia da ligação aço-concreto pode ser mensurada por meio da relação tensão de aderência *versus* deslizamento, que demonstra a variação da tensão observada na interface entre esses materiais relacionada ao deslocamento entre eles (FERNANDES e EL DEBS, 2000).

Em relação à perda da aderência, Dumêt (2003) e Garcia-Taengua *et al.* (2016) afirmam que ela ocorre, geralmente, de dois modos: falha por arrancamento da barra de aço, ou falha por fendilhamento (quando ocorre o fendilhamento do concreto do entorno da barra devido às tensões radiais observadas nessa região). Dumêt (2003) explica que diversos fatores interferem no modo de falha, como: tipo, conformação superficial ou diâmetro da armadura, espaçamento entre as armaduras e cobrimento, emprego ou não de armaduras de confinamento e a resistência do concreto. A ruptura por arrancamento mostra-se mais dúctil que a por fendilhamento e apresenta tensão de aderência superior em elementos de mesmas características, conforme a Fig. 2.1 (DUMÊT, 2003).

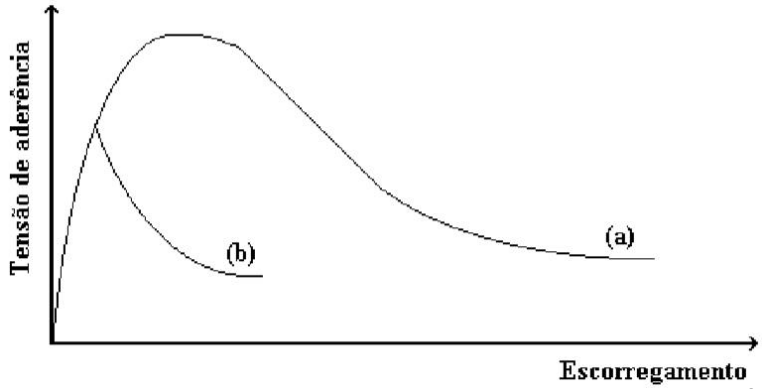


Figura 2.1 - Rupturas por arrancamento (a) e por fendilhamento (b) – DUMÊT (2003)

2.1.1. Fatores que interferem na aderência

Segundo Angst *et al.* (2017), as propriedades observadas na interface aço-concreto são influenciadas por diversos fatores relacionados a esses dois materiais. Os autores afirmam que esses aspectos levam à heterogeneidade da interface, interferindo na aderência aço-concreto.

Pesquisas que avaliam os fatores que influenciam na aderência têm sido realizadas há bastante tempo. Rehm (1968) foi um dos precursores nos estudos de aderência e suas pesquisas apontam que ela está relacionada à conformação superficial da barra, resistência do concreto e posição da barra durante a concretagem. Para Barbosa (2001), são vários os fatores que interferem na aderência, sendo, os mais estudados por diversos autores na literatura, os que são mostrados na Tab. 2.1.

Tabela 2.1 - Fatores que interferem na aderência aço-concreto

Fator	Comportamento do fator	Comportamento da aderência
Resistência mecânica do concreto	Aumenta	Aumenta
Superfície das barras	Aumento da rugosidade	Aumenta
Diâmetro das barras	Aumenta	Diminui
Área relativa da nervura	Aumenta	Aumenta
Posição das barras na concretagem	Horizontal (superior)	Diminui
Idade do ensaio	Aumenta	Aumenta
Adensamento	Aumenta	Aumenta
Carregamento cíclico	Aumenta	Diminui

Fonte: Barbosa, 2001.

Dumêt (2003) ressalta que fatores como a existência de armaduras de confinamento, o cobrimento de concreto, a retração e o tipo de carregamento do elemento estrutural também podem afetar a resistência de aderência.

Entre os fatores apresentados, a resistência do concreto tem sido um dos mais pesquisados. Segundo ACI Committee 408 (2003), EN:1992-1-1 (2004) e ABNT-NBR 6118 (2014), a resistência de aderência é função da resistência à tração do concreto. Portanto, no que diz respeito aos materiais empregados no concreto (cimento, areia, brita, aditivos), aqueles que influenciam na resistência à tração poderiam influenciar na resistência de aderência.

Conforme citado na introdução do trabalho, pretende-se, com esta pequisa e outras já realizadas, fornecer informações relevantes visando a regulamentação de um ensaio de arrancamento brasileiro. Portanto, preocupa-se quanto ao tipo de material empregado no corpo de prova para o ensaio de aderência. Essa questão torna-se ainda mais relevante, tendo-se em vista a grande heterogeneidade de materiais de construção encontrados no mundo. Para uma breve análise da importância dos materiais na resistência à tração/aderência do concreto, serão citados alguns trabalhos que abordaram esse tema.

Quanto à influência da origem mineralógica dos agregados graúdos na resistência do concreto, pode-se citar os trabalhos de Özturan e Çeçen (1997) e Wu *et al.* (2001). Özturan e Çeçen (1997) pesquisaram a interferência do tipo de agregado graúdo na resistência à tração, utilizando ensaios de tração por compressão diametral e de flexão a três pontos. No estudo, foram realizadas três misturas para cada tipo de agregado graúdo utilizado, sendo, estes, de basalto, calcário e cascalho redondo, com dimensão máxima de 19 mm. As misturas apresentaram diferentes relações água/cimento (0,3; 0,4 e 0,58). Os autores concluíram que a influência do tipo de agregado na resistência à tração do concreto foi maior para os concretos com menor relação água/cimento. Para a relação a/c de 0,58, eles observaram que a influência do tipo de agregado foi menor, sendo, a pasta de cimento, responsável pela resistência.

Wu *et al.* (2001) desenvolveram uma pesquisa na qual analisaram a influência do tipo de agregado graúdo nas propriedades do concreto, sendo utilizados concretos com diferentes resistências à compressão e agregados do tipo calcário, quartzito, mármore e granito, de dimensão máxima de 20 mm. Os

autores também concluíram que o tipo de agregado utilizado demonstra maiores impactos na resistência à tração dos concretos que possuem menor relação água/cimento.

Em relação ao teor ou dimensão máxima dos agregados graúdos, Pompeu Neto (2004) afirma que uma maior quantidade ou maior dimensão dos grãos levaria a uma redução na resistência à tração do concreto por formar pontos de fragilidade. O autor constatou que a zona de interface apresenta maior quantidade de poros que a pasta devido à formação de uma película de água em torno do grão.

Para os agregados miúdos, Donza *et al.* (2002) explicam que a forma e a superfície dos grãos não afetam a resistência mecânica de concretos com resistências entre 30 MPa e 40 MPa. Segundo os autores, mantendo-se o tipo de agregado graúdo e a relação água/cimento, o tipo de areia poderia influenciar a resistência à tração em concretos com resistências superiores a 50 MPa, considerados de alta resistência (DONZA *et al.*, 2002).

No que diz respeito à influência do tipo de cimento na resistência do concreto, citam-se os trabalhos de Ros e Shima (2013) e Valcuende e Parra (2009). Ros e Shima (2013) abordaram a influência dos tipos de cimento e da temperatura de cura nas resistências do concreto. Eles verificaram que, para as idades iniciais (até 7 dias), o tipo de cimento influencia de maneira significativa na resistência à tração do concreto. Valcuende e Parra (2009) realizaram um estudo sobre a aderência entre o aço e o concreto auto adensável em que uma das variáveis analisadas na pesquisa foi a resistência do cimento. As misturas produzidas apresentavam resistências de 32 MPa e 42 MPa. Os autores concluíram que com o acréscimo na resistência do cimento, a tensão última de aderência aumenta.

A relação água/cimento é considerada um importante parâmetro para a resistência do concreto. De acordo com Neville (1997), a quantidade de água utilizada na mistura está relacionada à quantidade de poros encontrada na pasta. O autor explica que quando se utiliza uma grande quantidade de água, sendo esta maior que a necessária para as reações químicas com o cimento, ela evapora e deixa vazios na pasta, criando regiões de fragilidade no concreto e reduzindo, dessa forma, a resistência à tração desses elementos.

Coêlho *et al.* (2005) analisaram a influência da relação água/cimento na resistência à tração do concreto, sendo utilizados variados consumos de cimento e diferentes relações a/c nas misturas. Os autores concluíram que os concretos que utilizaram quantidades semelhantes de cimento e maior relação a/c apresentaram uma redução na resistência à tração do concreto. Valcuende e Parra (2009) estudaram a interferência da variação da relação água/cimento na aderência entre o aço e o concreto auto adensável, sendo utilizadas misturas com relação de 0,65; 0,55 e 0,45. Os autores constataram que a redução da relação água/cimento leva a uma tensão última de aderência do concreto superior.

2.1.2. Ensaios de aderência

Existem alguns ensaios normatizados para determinação da tensão de aderência entre o aço e o concreto ou do coeficiente de conformação superficial das barras e fios de aço, como: ensaio brasileiro de barras confinadas, ensaio de vigas rotuladas (*beam test*) e ensaio de arrancamento (*pull-out test*). A seguir, tem-se uma breve descrição sobre os dois primeiros e um maior detalhamento sobre o terceiro ensaio, utilizado nesta pesquisa.

O ensaio de barras confinadas (ensaio de tirantes ou de conformação superficial de barras) é utilizado para determinação do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço e é regulamentado pela ABNT-NBR 7477 (1982) – “Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado”.

O corpo de prova desse ensaio é constituído por um elemento prismático de concreto com uma barra ou fio de aço no centro, conforme apresentado na Fig. 2.2. Um dia antes da realização do ensaio, os corpos de prova são pintados com água e cal para melhor visualização das fissuras. Os tirantes são, então, fixados no equipamento por meio de garras que se prendem nas extremidades livres da armadura, as quais são submetidas a esforços de tração (ABNT-NBR 7477, 1982).

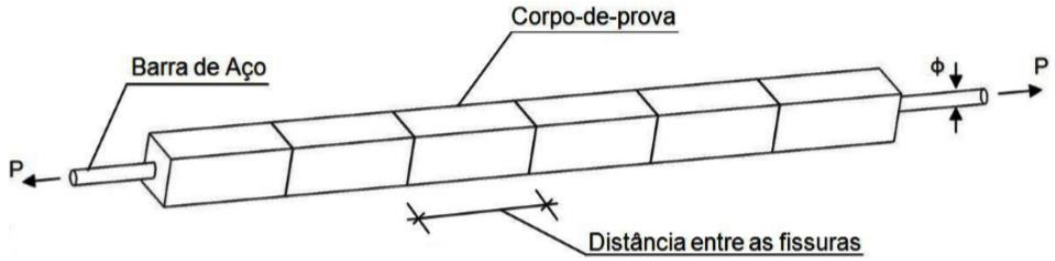


Figura 2.2 - Modelo do corpo de prova do ensaio de tirantes – FRANÇA (2010)

Durante a realização do ensaio, os esforços de tração são transferidos para o concreto circundante. Ao seu fim, a amostra deve apresentar mais de cinco fissuras. Por meio da análise das características das fissuras do corpo de prova, como aberturas e afastamentos, determina-se o coeficiente de conformação superficial (η) (ABNT-NBR 7477, 1982).

O ensaio de vigas rotuladas (*beam test*) é regulamentado pela EN:10080 (2005) e objetiva determinar a tensão de aderência aço-concreto. O corpo de prova utilizado é formado por dois paralelepípedos em concreto armado ligados por uma dobradiça na parte superior. Na parte inferior, tem-se uma barra de aço, sendo instalados, em suas extremidades, transdutores de deslocamento para medição dos deslizamentos, conforme a Fig. 2.3 (EN:10080, 2005).

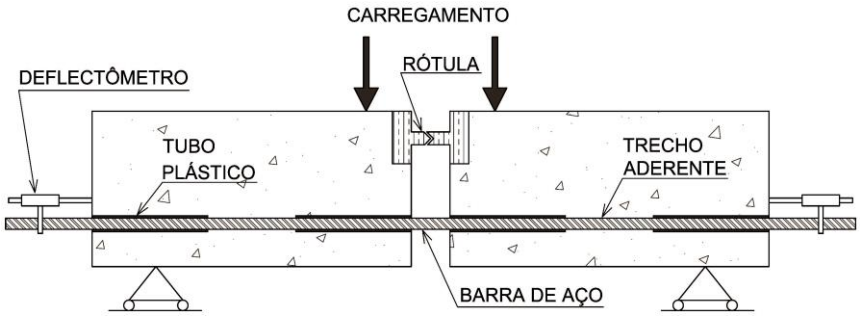


Figura 2.3 - Modelo do corpo de prova do ensaio de vigas rotuladas – Adaptado de EN:10080 (2005)

As dimensões dos elementos variam de acordo com o diâmetro da barra utilizada. As vigas são submetidas a esforços de flexão simples até que ocorra a ruptura da aderência aço-concreto ou a falha do reforço de aço. Por meio das leituras realizadas durante o ensaio, tem-se a curva força *versus* deslizamento. Para determinação da tensão de aderência por meio desse ensaio, utiliza-se uma equação proposta na norma, na qual são inseridos os valores da força aplicada e da área nominal da seção transversal da barra de aço (EN:10080, 2005).

Segundo Arel e Yazici (2012), o método mais antigo, simples e utilizado para determinação da resistência de aderência é o ensaio de arrancamento (*pull-out test*), o qual é regulamentado pela EN:10080 (2005).

O corpo de prova utilizado nesse ensaio é um cubo de concreto com uma barra de aço inserida em seu eixo. O cubo deve apresentar dimensões iguais a dez vezes o diâmetro da barra adotada (10ϕ), sendo utilizado o valor mínimo de 20 cm. Quanto à barra, a norma estipula um trecho com aderência de cinco vezes o diâmetro da barra (5ϕ). Suas extremidades devem ser projetadas para fora do cubo de concreto, conforme a Fig. 2.4 (EN:10080, 2005).

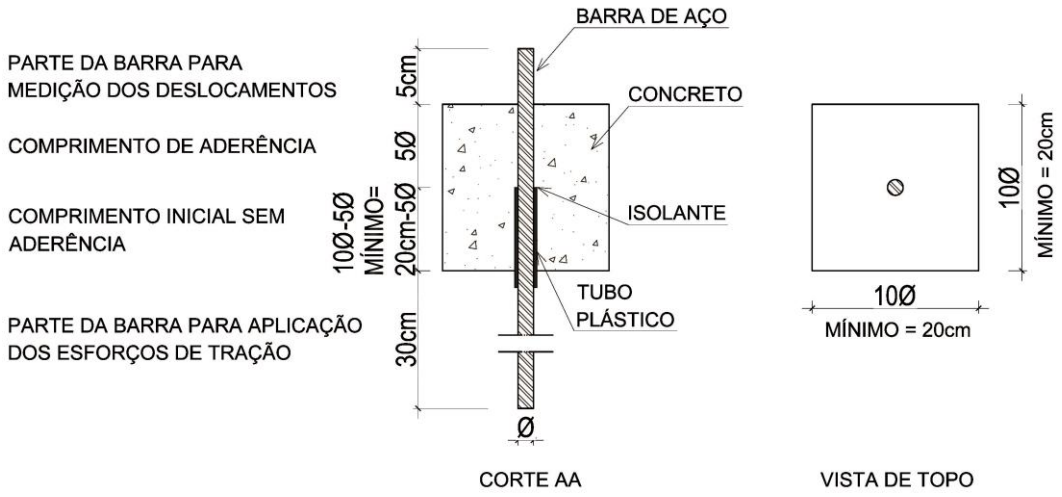


Figura 2.4 - Modelo do corpo de prova recomendado por norma – Adaptado de EN:10080 (2005)

Para realização do ensaio, posiciona-se o corpo de prova cúbico sobre a placa de apoio. A tração é aplicada utilizando-se a extremidade inferior e na superior posiciona-se o instrumento de medição dos deslocamentos observados durante o ensaio. A carga é aplicada sobre o corpo de prova até que seja alcançada a ruptura da aderência. Por meio das leituras realizadas pelo equipamento do ensaio, tem-se a curva força *versus* deslizamento. Na Fig. 2.5 é apresentado um esquema do ensaio de arrancamento (EN:10080, 2005).

A definição da tensão de aderência é realizada por meio da eq. 2.1, sugerida pela norma, que utiliza os valores da carga aplicada no ensaio, do diâmetro da barra de aço e do comprimento de ancoragem. Para definição da tensão última de aderência, utiliza-se a força máxima de arrancamento (EN:10080, 2005).

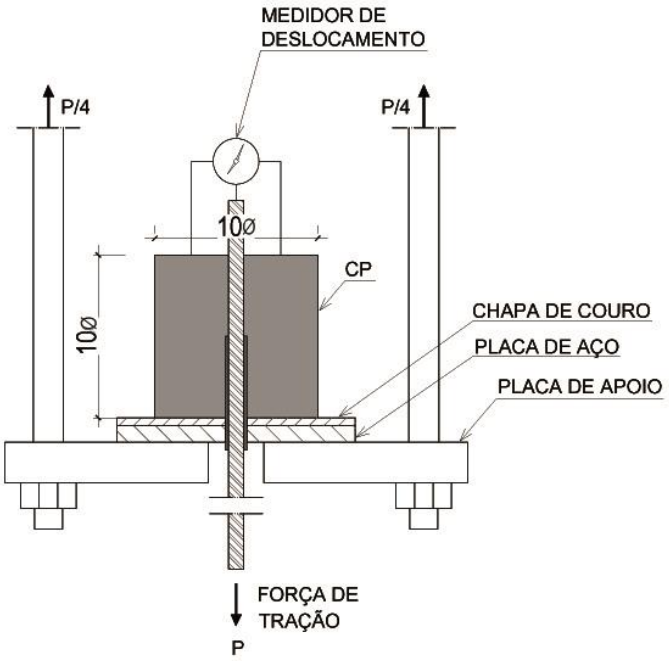


Figura 2.5 - Esquema do ensaio de arrancamento – Adaptado de EN:10080 (2005)

$$\tau = \frac{P}{\pi \cdot \phi \cdot l_b} \tag{2.1}$$

sendo:

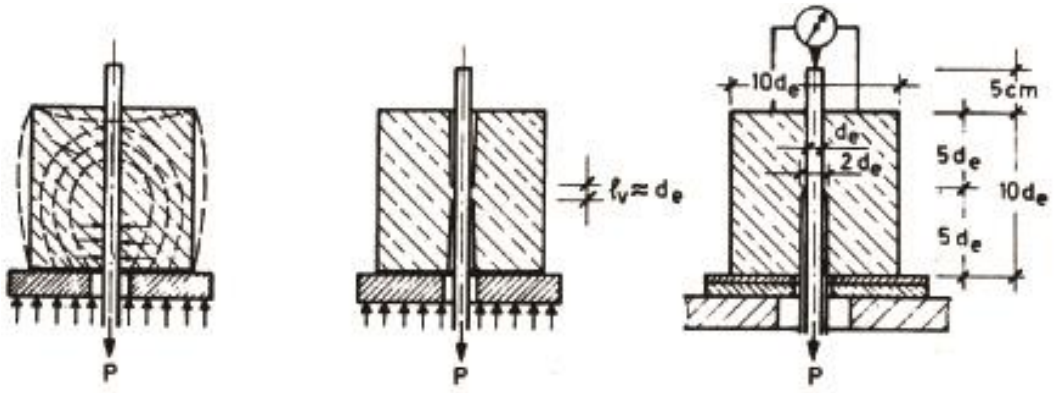
τ = tensão de aderência, em MPa;

P = carga aplicada, em Newton;

ϕ = diâmetro da barra, em milímetros;

l_b = comprimento de ancoragem, em milímetros.

Importante ressaltar que a configuração do corpo de prova pode alterar os valores da tensão de aderência. De acordo com Leonhardt e Mönnig (1977), o corpo de prova apresentado na Fig. 2.6-a mostra-se inadequado, uma vez que as restrições de deformação impostas pela placa de apoio, associada à compressão em arco sobre o corpo de prova, geram uma região de perturbação próxima à placa e uma aderência por atrito adicional. Dessa forma, Rehm (1968) propôs trechos sem aderência com o intuito de reduzir essas interferências por meio da utilização de um corpo de prova semelhante ao da Fig. 2.6-b. O modelo mais atual da EN:10080 (2005) é o apresentado pela Fig. 2.6-c, no qual mantém-se um trecho sem aderência próximo à placa de cinco vezes o diâmetro da barra utilizada.



(a) (b) (c)

Figura 2.6 - Corpos de prova para ensaio de arrancamento – LEONHARDT E MÖNNIG (1977)

No que diz respeito ao comprimento de ancoragem do corpo de prova, Montoya *et al.* (1974) sugerem que seja utilizado o ensaio de arrancamento modificado, no qual utiliza-se um comprimento de ancoragem de 10ϕ. Eles também apontam que devem ser adotados pedaços de tubos de PVC no início e no final do corpo de prova, anulando a aderência nessas regiões de perturbação.

Comparando-se os ensaios de aderência, tem-se:

a) o ensaio de barras confinadas mostra-se inadequado para a determinação do coeficiente de conformação superficial de barras de diâmetros inferiores a 10,0 mm (CARVALHO *et al.*, 2017);
b) o ensaio de vigas representa de forma precisa a aderência aço-concreto em elementos de concreto armado, mas é de difícil execução (ALMEIDA FILHO *et al.*, 2008);
c) o ensaio de arrancamento foi amplamente adotado em estudos no Brasil e em outros países para avaliar a tensão de aderência de uma barra submetida ao arrancamento direto. No entanto, há poucos estudos que abordaram as barras finas (FRANÇA, 2010 e CARVALHO *et al.*, 2017).

Os métodos geram resultados bem diferentes, dificultando uma avaliação objetiva da tensão de aderência dos elementos em concreto armado (POKORNY

et al., 2015). Dumêt (2003) aponta que o ensaio de arrancamento possibilita uma análise simples e específica dos fatores que interferem na aderência, mostrando sua grande relevância e justificando, dessa forma, sua utilização para uma melhor compreensão desse tema.

2.2. Equações que relacionam a resistência de aderência à resistência do concreto

As normas para projeto de estruturas de concreto armado estabelecem formulações para determinação teórica da resistência de aderência em função das características do concreto e do aço. No entanto, algumas dessas fórmulas não consideram o efeito do diâmetro da barra e do comprimento de ancoragem como parâmetros importantes para cálculo da resistência de aderência, podendo-se chegar a resultados distintos dos experimentais. Nos itens seguintes, serão apresentadas algumas formulações prescritas por normas que foram utilizadas para a análise dos resultados obtidos nos ensaios de arrancamento.

2.2.1. Resistência de aderência segundo o Model Code (2010)

O Model Code (2010) estabelece formulações para o cálculo da resistência máxima de aderência para carregamentos monotônicos, sendo levados em conta parâmetros como a conformação superficial da barra, o modo de falha e as condições de aderência. De acordo com a norma, consideram-se em boa condição quanto à aderência os trechos que possuam barras com inclinação de 45º a 90º em relação à horizontal ou com inclinação inferior a 45º que estão em uma distância de até 25 cm da face inferior ou a mais de 30 cm da superior. Para barras nervuradas, falha por arrancamento e boa condição de aderência, tem-se a eq. 2.2.

$$\tau_{máx} = 2{,}5\sqrt{f_{ck}} \tag{2.2}$$

sendo:

$\tau_{máx}$ = resistência máxima de aderência, em MPa;

f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto, em MPa.

Essa norma determina os parâmetros para obtenção da relação tensão de aderência *versus* deslizamento. Para barras nervuradas, falha por arrancamento, boas condições de aderência e concreto bem confinado, tem-se a curva apresentada na Fig. 2.7.

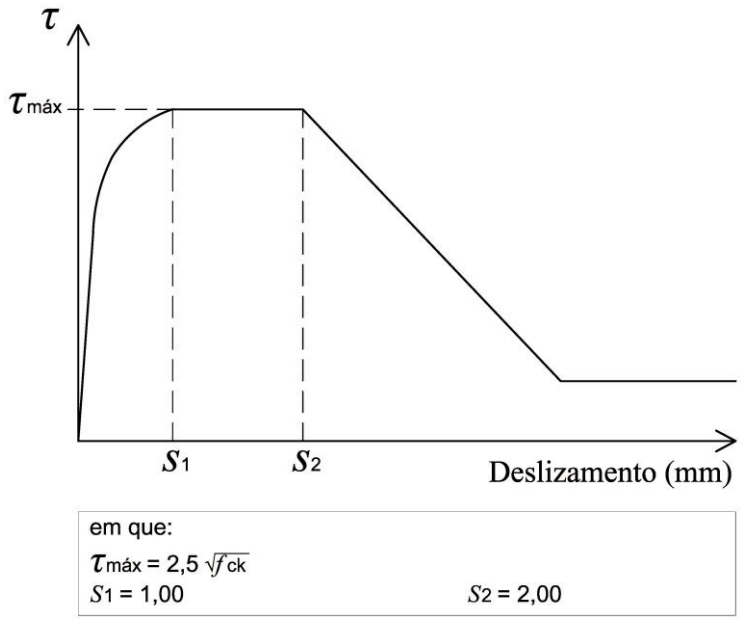


Figura 2.7 - Gráfico tensão *versus* deslizamento segundo o Model Code – Adaptado de MODEL CODE (2010)

Segundo o Model Code (2010), a resistência de aderência aço-concreto pode ser obtida como função do deslocamento relativo. De acordo com o gráfico da Fig. 2.7, tem-se a resistência máxima de aderência em um deslizamento de 1,0 mm e um patamar entre os deslizamentos de 1,0 mm e 2,0 mm (MODEL CODE, 2010).

2.2.2. Resistência de aderência segundo a ABNT-NBR 6118 (2014)

De acordo com a ABNT-NBR 6118 (2014) – “Projeto de estruturas de concreto – Procedimento”, tem-se, para cálculo da resistência de aderência de cálculo (f_{bd}), a eq. 2.3:

$$f_{bd} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot f_{ctd} \tag{2.3}$$

sendo:

η_1 = coeficiente de aderência que depende da conformação superficial da barra de aço, apresentando os valores:

$$\eta_1 = \begin{cases} 1{,}0 \;\; para\ barras\ lisas \\ 1{,}4 \;\; para\ barras\ entalhadas \\ 2{,}25 \;\; para\ barras\ nervuradas \end{cases}$$

η_2 = coeficiente de aderência que depende da posição das barras de aço durante a concretagem, de valores:

$$\eta_2 = \begin{cases} 1{,}0 \;\; para\ situação\ de\ boa\ aderência \\ 0{,}7 \;\; para\ situação\ de\ má\ aderência \end{cases}$$

η_3 = coeficiente de aderência que depende do diâmetro da barra de aço, sendo:

$$\eta_3 = \begin{cases} 1{,}0 \;\; para\ \phi < 32mm \\ \dfrac{(132 - \phi)}{100} \;\; para\ \phi \geq 32mm \end{cases}$$

em que: ϕ = diâmetro da barra, em milímetros.

f_{ctd} = valor de cálculo da resistência à tração do concreto, definido pela eq. 2.4:

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,\inf}}{\gamma_c} \tag{2.4}$$

em que:

γ_c = coeficiente de ponderação da resistência do concreto;

$f_{ctk,inf}$ = valor inferior para a resistência característica à tração do concreto (eq. 2.5).

$$f_{ctk,\inf} = 0{,}7 \cdot f_{ct,m} \tag{2.5}$$

sendo:

$f_{ct,m}$ = resistência média à tração do concreto, obtida de acordo com a resistência à compressão do concreto. Para as classes até C50, segue-se a eq. 2.6:

$$f_{ct,m} = 0{,}3 \cdot f_{ck}^{\,2/3} \tag{2.6}$$

Para as classes C55 a C90, a resistência média à tração do concreto é determinada pela eq. 2.7:

$$f_{ct,m} = 2{,}12 \cdot \ln\left(1 + 0{,}11 f_{ck}\right) \tag{2.7}$$

em que:
$f_{ct,m}$ e f_{ck} são expressos em megapascal (MPa).

2.3. Estudos sobre a aderência aço-concreto

Neste item serão apresentados estudos de alguns autores acerca da aderência aço-concreto nos quais foram analisados diversos parâmetros que influenciam na mesma.

Como já mencionado, Rehm (1968) foi um dos precursores no estudo da aderência aço-concreto. Ele realizou um estudo sobre a relação de determinados fatores com a resistência de aderência utilizando ensaios de arrancamento. Nos ensaios foram utilizados corpos de prova cúbicos com dimensões de 10 cm e 20 cm, comprimento de ancoragem de 16 mm, barras lisas de 16,0 mm de diâmetro e nervuradas de 12,0 mm, 13,0 mm, 14,0 mm e 24,0 mm. Entre os parâmetros analisados estavam: superfície da barra (lisa ou nervurada), aspectos das nervuras (altura e espaçamento) e posição da barra durante a concretagem (vertical ou horizontal).

O autor concluiu que, quanto ao tipo de superfície das barras, as nervuradas apresentam maior aderência quando comparadas às lisas, uma vez que o concreto entre as nervuras aumenta a resistência de aderência. Em relação à configuração das nervuras, o autor afirma que a tensão de aderência aumenta à medida que a relação altura das nervuras/espaçamento entre elas também aumenta. Quanto à influência da posição da barra durante a concretagem, o autor verificou que barras verticais com aplicação de carga no sentido contrário ao da concretagem apresentam maior resistência de aderência. Quando a aplicação de carga ocorre no mesmo sentido que o da concretagem, há uma redução na tensão de aderência, comparado ao caso anterior. Já nas barras horizontais, ocorre a segregação do concreto na região inferior da armadura, com consequente formação de poros (Fig. 2.8) e perda da resistência de

aderência. O autor aponta que a formação desses poros ocasiona uma perda de área de contato entre o concreto e a nervura da armadura, levando, consequentemente, à perda da aderência mecânica.

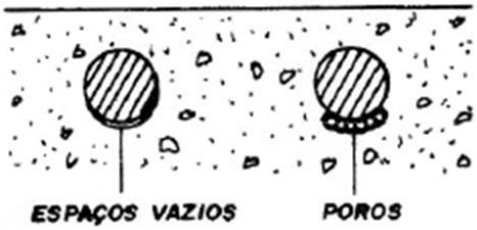


Figura 2.8 - Formação de espaços vazios ou poros sob barras horizontais – LEONHARDT e MÖNNIG (1977)

Fernandes e El Debs (2000) estudaram a aderência aço-concreto sob a ação de carregamentos monotônicos e cíclicos utilizando ensaios de arrancamento (*pull-out test*). Os ensaios seguiram as recomendações da RILEM, sendo utilizados comprimento de ancoragem de 5ϕ, corpos de prova modificados cilíndricos de diâmetro e altura iguais a 10ϕ e concreto com resistência à compressão de 30 MPa. Os parâmetros avaliados foram: diâmetro da barra nervurada de aço CA-50 (10,0 mm e 20,0 mm), tipo de carregamento (monotônico e cíclico) e amplitude do carregamento repetido ($\tau_{máx}$ e $\tau_{mín}$). As autoras concluíram que, para carregamento monotônico, as barras de menor diâmetro apresentaram valor superior para a tensão última de aderência. Comparando a aderência monotônica com a cíclica, observaram que a principal diferença é que a adesão é perdida no primeiro ciclo. Em relação ao nível de carregamento, observaram que quanto maior a força máxima cíclica, maior será o deslizamento residual.

Rosales *et al.* (2016) realizaram um estudo da aderência aço-concreto visando a análise dos corpos de prova utilizados nos ensaios de arrancamento, os quais apresentavam geometria cilíndrica (15 cm x 20 cm) e cúbica (dimensões iguais a 20 cm), comprimento de ancoragem de 10 cm e utilizavam concreto com resistência à compressão de 30 MPa. Os parâmetros avaliados foram os tipos de CPs (cilíndricos e cúbicos) e o diâmetro das barras de aço CA-50 (8,0 mm, 10,0 mm e 12,0 mm). Os autores observaram que os CPs cilíndricos apresentaram resistência máxima de aderência de valor superior a dos CPs cúbicos. Eles atribuíram esse fato à possível melhor distribuição de tensões dos corpos de prova cilíndricos. Quanto ao diâmetro da barra, os autores verificaram um aumento da rigidez do contato (relação entre variação da tensão de

aderência e variação do deslizamento correspondente) à medida que o diâmetro da barra de aço aumenta, provavelmente devido à maior área de contato ou nervuras de maiores dimensões.

A partir das necessidades do mercado e do desenvolvimento das técnicas construtivas, tem-se uma melhoria nas propriedades dos materiais com o desenvolvimento de concretos de características especiais, como os concretos de alta resistência, auto adensáveis, de alto desempenho, com agregados leves, com fibras de aço e com altos teores de adições. Verifica-se-se, ainda, uma preocupação quanto às questões ambientais, o que tem levado à realização de estudos que retratem os agregados reciclados. Dessa forma, observa-se um aumento na quantidade de estudos que abordam esses materiais, podendo-se citar alguns como o de Zhu *et al.* (2004), Almeida Filho *et al.* (2008), Valcuende e Parra (2009), Arel e Yazici (2012), Pop *et al.* (2013), Garcia-Taengua *et al.* (2016), Kaffetzakis e Papanicolaou (2016), Shen *et al.* (2016), Al-Shannag e Charif (2017), Wardeh *et al.* (2017) e Zaini-Rijal e Rahman (2017).

Zhu *et al.* (2004) estudaram a aderência e as propriedades na interface entre o aço e os concretos convencional e auto adensável (CAA) utilizando ensaios de arrancamento. Para produção do CAA tentou-se utilizar uma relação água/cimento igual ou próxima à do concreto convencional, sendo adicionado pó de calcário nessa mistura. Os ensaios seguiram as recomendações da RILEM, utilizando, no entanto, corpos de prova de seção transversal 10 cm x 10 cm, altura de 15 cm e comprimento de ancoragem de 12 cm para todas as barras. As variáveis analisadas foram: diâmetro da barra de aço (12,0 mm e 20,0 mm), resistência à compressão (35 MPa e 60 MPa) e tipo de concreto (auto adensável e convencional vibrado). Os autores concluíram que com o aumento do diâmetro da barra utilizada há um decréscimo na tensão máxima de aderência e que concretos com maiores resistências à compressão ou auto adensáveis apresentam maior resistência máxima de aderência.

Almeida Filho *et al.* (2008) estudaram a aderência entre o aço e o concreto auto adensável utilizando ensaios de arrancamento e de vigas rotuladas. Os ensaios de arrancamento seguiram as recomendações da RILEM, sendo utilizados corpos de prova modificados de formato cilíndrico com diâmetro e altura iguais a 10ϕ e um comprimento de ancoragem de 5ϕ. Os parâmetros avaliados foram: tipo de ensaio (ensaio de arrancamento e de vigas rotuladas), tipo de concreto

(convencional-CC e auto adensável-CAA), resistência à compressão do concreto (30 MPa e 60 MPa) e diâmetro da barra (10,0 mm e 16,0 mm). Para o ensaio de arrancamento, os autores concluíram que o CAA, em geral, apresenta tensão última de aderência superior ao CC. Os autores verificaram, ainda, que para concretos com maior resistência à compressão, tem-se maiores valores de tensão última de aderência, ocorrendo falha por arrancamento para a classe C30 e por fendilhamento para a C60. Por fim, eles constataram maior tensão última de aderência para barras de menor diâmetro (10,0 mm) nos concretos de 30 MPa e para as de maior diâmetro (16,0 mm) nos concretos de 60 MPa (ruptura por fendilhamento). Em relação aos ensaios, os autores afirmaram que o ensaio de arrancamento, devido à pequena variação nos resultados e facilidade de execução, mostra-se confiável e o mais indicado para determinar a resistência de aderência.

Valcuende e Parra (2009) realizaram um estudo sobre a aderência entre o aço e o concreto auto adensável por meio de ensaios de arrancamento. Os ensaios seguiram as recomendações da RILEM, sendo utilizados corpos de prova cúbicos com dimensões iguais a 20 cm, barras de 16,0 mm de diâmetro e comprimento de ancoragem de 5ϕ (80 mm). Os parâmetros avaliados foram: tipo de concreto (convencional-CC ou auto adensável-CAA), relação água/cimento (0,65, 0,55 e 0,45), resistência do cimento (32 MPa e 42 MPa) e idade do concreto (28 e 90 dias). Os autores concluíram que, em geral, a tensão última de aderência é superior em CAA, diminuindo essa diferença à medida que a resistência à compressão do concreto aumenta (para concretos de classe superior à C50, a tensão última de aderência desses dois tipos de concreto é praticamente igual). Eles observaram, ainda, que com a diminuição da relação água/cimento ou acréscimo na resistência do cimento, a tensão última de aderência aumenta. Em geral, os autores constataram maior tensão última de aderência para concretos de maior idade.

Arel e Yazici (2012) estudaram a influência do cobrimento de concreto e do tempo de cura na resistência de aderência em concretos de diferentes resistências à compressão utilizando-se ensaios de arrancamento. Para os ensaios, foram utilizados corpos de prova cúbicos de 15 cm, barras nervuradas de 14,0 mm e comprimento de ancoragem de 5ϕ (70 mm). Os fatores analisados na pesquisa foram: resistência à compressão do concreto (entre 13 MPa e 75 MPa), tempo de cura (3, 7, 14 e 28 dias) e cobrimento de concreto (40 mm,

55 mm e 70 mm). Os autores concluíram que, ao aumentar o tempo de cura, a resistência à compressão ou o cobrimento de concreto, aumenta-se a carga aplicada necessária para extrair a barra de aço do concreto e, por conseguinte, a tensão última de aderência.

Pop *et al.* (2013) abordaram o estudo da aderência entre o aço e os concretos auto adensável e convencional utilizando ensaios de arrancamento. Os ensaios seguiram as recomendações da RILEM, sendo utilizados corpos de prova cúbicos de dimensões iguais a 10ϕ. Os parâmetros avaliados foram: tipo de concreto (auto adensável-CAA e convencional-CC), resistência à compressão do concreto (50 MPa e 70 MPa), diâmetro da barra (10,0 mm, 12,0 mm e 14,0 mm) e comprimento de ancoragem (3ϕ, 4ϕ e 5ϕ). Os autores concluíram que o CAA apresentou, em geral, maior tensão última de aderência para os concretos da classe C50. Para a classe C70 não houve muita diferença nos resultados para cada tipo de concreto. Eles constataram, ainda, que as diferenças entre os tipos de concreto são maiores em concretos de menor resistência à compressão e que a resistência de aderência tende a reduzir quando o diâmetro da barra ou o comprimento de ancoragem aumentam.

Garcia-Taengua *et al.* (2016) realizaram um estudo sobre a adição de fibras de aço no concreto e a sua influência na aderência por meio de ensaios de arrancamento. Os ensaios seguiram a RILEM, sendo utilizado um corpo de prova cúbico de dimensões iguais a 10ϕ (mínimo 20 cm) e comprimento de ancoragem de 5ϕ. As variáveis analisadas foram: resistência à compressão do concreto (entre 30 MPa e 50 MPa), diâmetro da barra nervurada (8,0 mm, 12,0 mm, 16,0 mm e 20,0 mm), cobrimento de concreto e teor de fibra de aço. Os autores concluíram que ao aumentar a resistência à compressão do concreto, o diâmetro da barra, o cobrimento de concreto ou o teor das fibras de aço, tem-se uma maior resistência de aderência.

Kaffetzakis e Papanicolaou (2016) estudaram a aderência entre o aço e concretos auto adensáveis com agregados leves, por meio de ensaios de arrancamento e de vigas. Os ensaios de arrancamento seguiram, em parte, as recomendações da RILEM, sendo utilizados concretos das classes C30 a C50 e dois tipos de corpos de prova cilíndricos: um com diâmetro e altura iguais a 10ϕ e comprimento de ancoragem de 5ϕ e outro com diâmetro de 10ϕ, altura de 20ϕ e comprimento de ancoragem de 10ϕ. Os parâmetros analisados foram:

diâmetro da barra (12,0 mm e 16,0 mm) e comprimento de ancoragem (5ϕ e 10ϕ). Os resultados dos ensaios de arrancamento indicaram que, ao aumentar o diâmetro da barra ou o comprimento de ancoragem, tem-se, em geral, uma menor tensão última de aderência. Quanto aos agregados leves, os autores concluíram que concretos de maiores densidades apresentam tensão última de aderência superior.

Shen *et al.* (2016) realizaram um estudo da aderência entre o aço e o concreto de alta resistência de diferentes idades por meio de ensaios de arrancamento que utilizaram corpos de prova cúbicos de 16 cm, barras de 16,0 mm e comprimento de ancoragem de 5ϕ (80 mm). Os parâmetros avaliados foram: a idade (1, 3, 5, 7, 14 e 28 dias) e a resistência à compressão do concreto (entre 6 MPa e 50 MPa). Os autores concluíram que, ao aumentar a idade ou a resistência à compressão do concreto, aumenta-se a resistência de aderência.

Al-Shannag e Charif (2017) estudaram a aderência entre o aço e concretos estruturais leves por meio de ensaios de arrancamento que utilizaram corpos de prova cúbicos de dimensões iguais a 15 cm e comprimento de ancoragem de 15 cm (todo o trecho da barra que estava dentro do corpo de prova estava em contato com o concreto, sem nenhuma parte isolada). Os parâmetros avaliados foram a resistência à compressão do concreto (30 MPa e 45 MPa) e o diâmetro das barras nervuradas (12,0 mm, 14,0 mm, 16,0 mm, 20,0 mm e 25,0 mm). Os autores concluíram que, com o aumento da resistência à compressão do concreto, aumenta-se a tensão última de aderência e que esta tende a reduzir com o aumento do diâmetro da barra, como observado na literatura. Eles verificaram que todos os corpos de prova apresentaram falha por fendilhamento devido às condições inadequadas de confinamento. Segundo os autores, analisando-se as equações prescritas em norma para determinação da aderência, tem-se que elas devem ser reavaliadas para o uso em concretos estruturais leves e que, se utilizadas, devem ser empregadas com cautela.

Wardeh *et al.* (2017) realizaram um estudo da aderência entre o aço e concretos produzidos com agregados reciclados utilizando ensaios de arrancamento. Os ensaios seguiram as recomendações da RILEM, sendo, no entanto, utilizados corpos de prova cilíndricos de 11 cm x 15 cm. Em relação ao comprimento da barra que ficaria dentro do corpo de prova, dois trechos foram isolados com tubo PVC, o superior e o inferior. Dessa forma, o comprimento de aderência

localizava-se somente na altura central do corpo de prova. As variáveis dos ensaios foram o tipo de agregado (natural ou reciclado de construção civil), resistência à compressão do concreto (C25/30 e C35/45), comprimento de ancoragem (5ϕ e 10ϕ) e diâmetros das barras de aço (10,0 mm e 12,0 mm). Os autores concluíram que o comportamento da aderência utilizando-se o agregado reciclado foi similar ao comportamento quando utilizado o agregado natural. Eles verificaram que, com o aumento da resistência à compressão do concreto, aumenta-se a tensão última de aderência e que esta tende a reduzir com o aumento do comprimento de ancoragem. Quanto à alteração do diâmetro, nenhuma conclusão pôde ser realizada.

Zaini-Rijal e Rahman (2017) estudaram a aderência entre barras nervuradas e diferentes misturas de concreto por meio de ensaios de arrancamento que utilizaram corpos de prova cilíndricos de 10 cm x 15 cm e um comprimento de ancoragem de 6,5 cm. As variáveis foram: diâmetro das barras (16,0 mm e 20,0 mm) e tipo de mistura de concreto (das classes C30, C40 e C50 e concreto com fibra de aço). Os autores concluíram que, em geral, com o aumento do diâmetro da barra de aço, tem-se uma redução da resistência máxima de aderência. Quanto à resistência à compressão do concreto, observaram que ao aumentá-la foram obtidos valores superiores para a resistência máxima de aderência. Em relação às misturas de concreto ensaiadas, verificaram que as fibras de aço adicionadas ao concreto proporcionaram um aumento na resistência máxima de aderência, uma vez que elas controlam o desenvolvimento e a propagação das fissuras.

No que diz respeito aos estudos com barras finas de aço, tem-se os trabalhos de Barbosa (2001), França (2010) e Carvalho *et al.* (2017). Barbosa (2001) estudou a aderência entre o aço e concretos com diferentes resistências à compressão utilizando ensaios de arrancamento e de tirantes. Os ensaios de arrancamento seguiram as recomendações da RILEM, sendo utilizados corpos de prova cúbicos de dimensões iguais a 10ϕ (mínimo de 20 cm) e comprimento de ancoragem de 5ϕ. Entre os parâmetros avaliados no estudo, tem-se: resistência à compressão do concreto (20, 40, 60, 80 e 100 MPa) e diâmetro da barra (6,3 mm, 8,0 mm, 10,0 mm, 12,5 mm, 16,0 mm, 20,0 mm e 25,0 mm). A autora observou um aumento da tensão última de aderência com o aumento da resistência à compressão do concreto ou do diâmetro da barra (contrariando a literatura nesta última conclusão). Por meio dos resultados obtidos nos ensaios

de arrancamento, a autora aponta que um coeficiente de variação inferior a 25% indica que as amostras são aceitas.

França (2010) abordou o estudo da aderência entre o concreto convencional e barras finas de aço CA-50 por meio de ensaios de arrancamento. Os ensaios seguiram as recomendações da RILEM, sendo utilizados corpos de prova cúbicos de 20 cm e comprimento de ancoragem de 5ϕ. As variáveis analisadas foram: diâmetro das barras nervuradas (6,3 mm, 8,0 mm e 10,0 mm) e a resistência à compressão do concreto (25 MPa e 40 MPa). A autora concluiu que para os concretos da classe C40, ao aumentar o diâmetro, a tensão última de aderência diminui. Esse comportamento também poderia ser constatado para a classe C25, no entanto, os resultados para a barra de 10,0 mm de diâmetro demonstraram grande variação. Quanto à resistência à compressão, a autora afirma que, para as barras de 6,3 mm e 8,0 mm, a classe de concreto C40 apresenta maiores tensões de aderência quando comparada à C25. A autora aponta, ainda, que houve uma grande dispersão nos resultados que pode ter sido gerada devido ao pequeno comprimento de ancoragem de 5ϕ, sugerindo maiores pesquisas em torno desse parâmetro.

Carvalho *et al.* (2017) abordaram o estudo da aderência entre o concreto da classe C25 e armaduras finas por meio de ensaios de arrancamento, de vigas rotuladas e de barras confinadas. Os ensaios de arrancamento seguiram as recomendações da RILEM, sendo utilizados corpos de prova cúbicos de dimensões iguais a 20 cm e comprimento de ancoragem de 5ϕ. As variáveis analisadas foram: tipo e diâmetro das armaduras (barras nervuradas CA-50: 6,3 mm, 8 mm e 10 mm e fios entalhados CA-60: 5,0 mm, 8,0 mm e 9,5 mm) e tipo de ensaio (ensaios de arrancamento, de vigas rotuladas e de barras confinadas). Os autores concluíram que as barras nervuradas apresentam um valor superior de resistência máxima de aderência quando comparadas aos fios entalhados. Quanto aos ensaios, observaram que o de barras confinadas mostrou-se inadequado para as barras finas e que o estudo do desempenho de aderência poderia ser realizado utilizando-se ensaios de arrancamento. Eles apontaram, ainda, que houve uma grande dispersão nos resultados dos ensaios de arrancamento provavelmente causada pelo pequeno comprimento de ancoragem de 5ϕ, uma vez que qualquer pequena interferência na interface aço-concreto pode resultar em alteração significativa na resistência de aderência.

Dessa forma, os autores sugeriram, para barras finas, a adoção de um corpo de prova com comprimento de ancoragem de 10ϕ.

Por meio da revisão da literatura, pôde-se observar que o estudo da aderência aço-concreto utilizando ensaios de arrancamento tem sido realizado, em sua maioria, para as barras de diâmetros iguais ou superiores a 10,0 mm. Há uma escassez de trabalhos que abordem barras de diâmetros inferiores, que são comumente utilizadas nos dias de hoje devido ao emprego do concreto de alta resistência e à necessidade de criação de elementos estruturais esbeltos.

O concreto de alta resistência vem sendo cada vez mais empregado devido ao avanço da tecnologia e das técnicas que possibilitaram uma melhoria nas propriedades dos materiais. Na literatura são encontrados estudos que abordam os concretos de classes elevadas, no entanto, os mesmos apresentam variadas adições e não adotam barras finas.

Quanto ao comprimento de ancoragem, verificou-se uma grande variedade nos valores adotados nos corpos de prova. Constatou-se, ainda, uma significativa variação nos resultados dos ensaios de arrancamento que utilizaram o comprimento de ancoragem de 5ϕ sugerido pela EN:10080 (2005).

Em geral, verifica-se que os estudos seguem a norma RILEM, que se assemelha à EN:10080 (2005). No entanto, observa-se que os ensaios apresentam uma grande variação em relação às recomendações prescritas na norma, como dimensões e forma do corpo de prova e comprimento de ancoragem utilizado, os quais provavelmente influenciam na tensão de aderência.

Diante do exposto, este trabalho procura contribuir para o estudo do comportamento da aderência entre barras finas e concretos de diferentes classes. Considerou-se importante uma maior pesquisa a respeito da influência do diâmetro da barra de aço e da resistência à compressão do concreto na tensão de aderência, visando a obtenção de dados relevantes para uma possível padronização do ensaio de arrancamento no Brasil.

3. Materiais e Métodos

Objetivando estudar a aderência entre barras finas de aço e o concreto, serão apresentados os materiais e métodos para os ensaios de caracterização e de arrancamento referentes a esta pesquisa.

Os ensaios de arrancamento foram realizados com o intuito de se determinar as tensões máximas de aderência entre as barras finas nervuradas e os concretos das classes C30 e C60. As variáveis estudadas foram a resistência à compressão do concreto (30 MPa e 60 MPa) e os diâmetros das barras de aço (6,3 mm, 8,0 mm e 10,0 mm).

3.1. Materiais

3.1.1. Concreto

Para os ensaios realizados, foram dosadas duas misturas. A primeira para um concreto com resistência característica à compressão de 30 MPa e a segunda para um concreto com resistência característica à compressão de 60 MPa, ambas aos 28 dias de idade. Nas Tab. 3.1 e 3.2 são mostrados os traços utilizados.

Tabela 3.1 - Traço utilizado para o concreto da classe C30

Traço (em peso) Cimento: areia: brita	**Cimento (kg/m³)**	**Relação a/c**	**Aditivo/cimento (%)**
1 : 2,70 : 2,98	317	0,70	2,00

Tabela 3.2 - Traço utilizado para o concreto da classe C60

Traço (em peso) Cimento: areia: brita	**Cimento (kg/m³)**	**Relação a/c**	**Aditivo/cimento (%)**
1 : 1,09 : 1,64	575	0,40	1,50

Para a confecção dos corpos de prova, foram selecionados materiais que se enquadrassem nos limites estabelecidos pela ABNT-NBR 7211 (2009) – “Agregados para concreto – Especificação”.

Como agregado miúdo, foi utilizada areia média natural de massa específica igual a 2,55 g/cm³, módulo de finura de 2,13 e diâmetro máximo igual a 2,4 mm. Para agregado graúdo, foi utilizada a brita 0 da BETONMIX–CA, de procedência da Mineração Santiago e origem mineral gnaisse, apresentando 2,68 g/cm³ de massa específica seca, módulo de finura de 5,99 e diâmetro máximo igual a 12,50 mm (especificações concedidas pela empresa).

Foi utilizado o cimento CPV ARI Fácil da Holcim e o aditivo superplastificante líquido MURAPLAST FK 22 para melhoria das condições de trabalhabilidade da mistura, resultando em um melhor adensamento. De acordo com o fornecedor (MC-Bauchemie), o superplastificante apresenta densidade de 1,16 g/cm³ e a dosagem indicada é de 0,2% a 3,0% sobre o peso do cimento.

3.1.2. Barras de aço

As barras de aço referentes aos ensaios de arrancamento foram do tipo CA-50, nervuradas, de diâmetros iguais a 6,3 mm, 8,0 mm e 10,0 mm, fornecidas pela Belgo Bekaert Arames.

3.2. Métodos

Neste item serão abordadas as metodologias adotadas nos ensaios de caracterização dos agregados, do concreto e das barras de aço e nos ensaios de arrancamento.

3.2.1. Caracterização dos agregados

A areia e a brita foram caracterizadas de acordo com a ABNT-NBR NM 248 (2003) – “Agregados - Determinação da composição granulométrica”.

Para determinação da massa específica da areia analisada, realizou-se o ensaio de acordo com a ABNT-NBR 9776 (1987) – “Agregados - Determinação da massa específica Chapman”. A massa específica do agregado graúdo foi obtida por meio da ABNT-NBR NM 53 (2009) – “Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água”.

3.2.2. Caracterização do concreto

Para a caracterização do concreto, foram realizados ensaios de compressão uniaxial e de tração por compressão diametral de acordo com as recomendações específicas da ABNT. O ensaio para determinação do módulo de elasticidade não foi possível de ser realizado, uma vez que o equipamento do laboratório do CEFET encontrava-se em manutenção.

Os ensaios foram efetuados nos mesmos dias dos ensaios de arrancamento de cada diâmetro de barra, aos 28 dias de idade do concreto, sendo utilizados pelo menos três corpos de prova cilíndricos (10 cm x 20 cm) de cada betonada para caracterização.

A moldagem e a cura dos corpos de prova foram realizadas de acordo com as recomendações da ABNT-NBR 5738 (2015) – “Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova”. Para as concretagens, foi utilizada a betoneira Mb 400L Super da Motomil e para adensamento dos corpos de prova, vibrador de imersão de concreto com agulha de 25 mm de diâmetro.

O ensaio de compressão uniaxial (Fig. 3.1) foi realizado de acordo com a ABNT-NBR 5739 (2007) – “Concreto – Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos”. O equipamento utilizado nesse ensaio foi a máquina universal DL 30000, da marca EMIC. Para aplicação da carga, utilizou-se uma prensa de 200 toneladas conectada à máquina. Os valores de carga foram aferidos pela célula de carga do equipamento, sendo, os dados, coletados pelo sistema de aquisição de dados da máquina universal, ligado a um computador.

O ensaio de tração por compressão diametral seguiu a ABNT-NBR 7222 (2011) – “Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos”. Para esse ensaio, foi utilizada a máquina universal DL 30000, da marca EMIC, a qual foi adaptada para esse tipo de ensaio, conforme a Fig. 3.2.



Figura 3.1 - Ensaio de compressão uniaxial



Figura 3.2 - Ensaio de tração por compressão diametral

3.2.3. Caracterização das barras de aço

Para obtenção dos módulos de elasticidade e das tensões de escoamento das barras de aço utilizadas, foram realizados ensaios de tração regulamentados pela ABNT-NBR 6892-1 (2013) – “Materiais metálicos – Ensaio de Tração – Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente”.

Os ensaios foram realizados pela máquina universal DL 30000, da marca EMIC, e os alongamentos das barras foram aferidos utilizando-se um “*clip gage*”. As leituras de carga e alongamento foram feitas por meio do sistema de aquisição de dados da máquina universal, ligado a um computador. Na Fig. 3.3, tem-se o ensaio de tração das barras de aço.



Figura 3.3 - Ensaio de tração da barra de aço

3.2.4. Ensaios de arrancamento

Para a realização dos ensaios de arrancamento, foram seguidas as recomendações da EN:10080 (2005), sendo, no entanto, utilizado um comprimento de ancoragem de 10ϕ, conforme sugerido no trabalho de Carvalho *et al.* (2017). Importante ressaltar que, de acordo com a EN:10080, tem-se um comprimento de ancoragem de 5ϕ.

3.2.4.1. Determinação do tamanho da amostra

Os ensaios de arrancamento foram planejados de acordo com a Tab. 3.3, resultando em um total de 36 corpos de prova cúbicos, todos ensaiados aos 28 dias de idade do concreto.

Para definição do número de repetições (n), foram utilizados os dados da pesquisa de Miranda e Carvalho (2017). As autoras analisaram amostras de n = 6 corpos de prova e, para barras de aço CA-50 e 8,0 mm de diâmetro, obtiveram uma tensão de aderência média amostral de 15,48 MPa ($\bar{x}$ = 15,48) e desvio padrão de 1,930 MPa (s= 1,930). A partir do valor obtido para o desvio padrão, as autoras calcularam o erro estatístico utilizando-se a eq. 3.1.

Tabela 3.3 - Planejamento dos ensaios de arrancamento

Resposta pesquisada	**Fatores**		**Número de repetições (*n*)**
	Resistência à compressão do concreto	Diâmetro das barras de aço CA-50 nervuradas (mm)	
	Níveis dos fatores		
Resistência de aderência	30 MPa	6,3	6
		8,0	6
		10,0	6
	60 MPa	6,3	6
		8,0	6
		10,0	6

$$e = t_{(n-1)} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \tag{3.1}$$

em que:

e = erro estatístico;

$t_{(n-1)}$ = valor obtido na tabela de Distribuição t de *Student*, para um nível de confiança de 95% (ver Anexo A);

s = desvio padrão;

n = número de repetições.

Dessa forma, obteve-se um erro de 2,026 MPa, ou seja, 13,09% da média amostral. Uma vez que os ensaios de arrancamento geralmente apresentam erros maiores, como a pesquisa de França (2010), que apresentou erros de cerca de 30%, considerou-se satisfatório um erro de aproximadamente 13%. Logo, preservou-se, nesta pesquisa, uma amostragem de 6 corpos de prova.

3.2.4.2. Moldagem dos corpos de prova

Seguindo as recomendações da EN:10080 (2005), foram utilizadas fôrmas cúbicas de madeira de dimensões internas iguais a 20 cm. Para o corpo de prova, foi adotado um comprimento de ancoragem modificado de 10ϕ. Importante ressaltar que o trecho não aderente mínimo de 5ϕ foi mantido, a fim de isolar a região de perturbação próxima à placa e evitar a criação de uma aderência por atrito adicional, conforme relatado por Leonhardt e Mönnig (1977).

Nas Fig. 3.4 e 3.5, imagens e detalhe esquemático das fôrmas de madeira utilizadas.



Figura 3.4 - Fôrma de madeira para CP cúbico

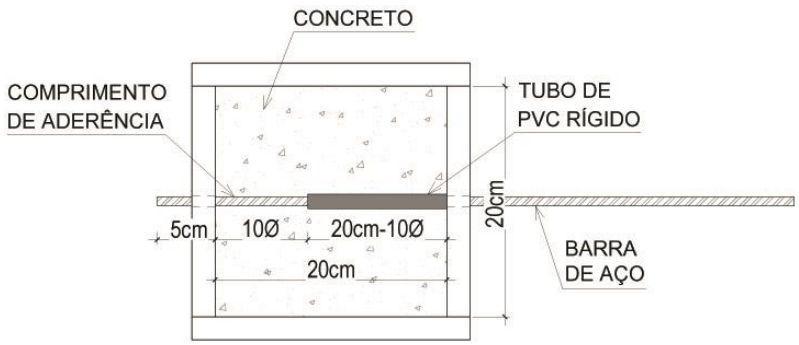


Figura 3.5 - Detalhe esquemático do CP cúbico

Para o comprimento sem aderência, foi utilizado eletroduto de PVC rígido de 12,5 mm de diâmetro e fita crepe nas suas extremidades para que o concreto não entrasse em contato com a barra dentro do tubo (Fig. 3.6).



Figura 3.6 - Isolamento do trecho sem aderência com tubo de PVC rígido

Para as concretagens, foi utilizada a betoneira Mb 400L Super da Motomil e para adensamento dos corpos de prova, vibrador de imersão de concreto com agulha de 25 mm de diâmetro. Após 24 horas, os corpos de prova cúbicos foram desmoldados e colocados em um tanque com água para cura por 28 dias, até serem retirados para realização dos ensaios de arrancamento. Na Fig. 3.7 são apresentadas as fôrmas de madeira antes e após a concretagem.



Figura 3.7 - Fôrmas de madeira antes e após a concretagem

3.2.4.3. Sistema de carregamento e de leitura

Os corpos de prova cúbicos foram ensaiados na máquina universal DL 30000, da marca EMIC. Por meio de um acessório auxiliar, o corpo de prova foi colocado na máquina universal. Para realização do ensaio, prendeu-se a extremidade inferior da barra de aço pela garra do equipamento e aplicou-se uma carga de tração. Na extremidade superior instalou-se o transdutor de deslocamento, o qual é acoplado a uma haste metálica vertical que se encaixa no cabo do suporte colocado sob o corpo de prova (ver Fig. 3.8). Dessa forma, realizou-se a medição dos deslizamentos da barra.

Por meio do sistema de aquisição de dados da máquina universal, foram feitas as leituras das cargas aplicadas e dos respectivos deslizamentos sofridos pela barra em relação ao concreto, resultando em uma curva de tensão de aderência (MPa) *versus* deslizamento (mm). A tensão de aderência foi obtida pela equação apresentada pela EN:10080 (2005), sendo, a mesma, já demonstrada nesta

pesquisa (eq. 2.1). Na Fig. 3.9, tem-se as imagens da máquina universal com o suporte e da máquina com o corpo de prova posicionado para início do ensaio de arrancamento.



Figura 3.8 - Detalhe do transdutor de deslocamento

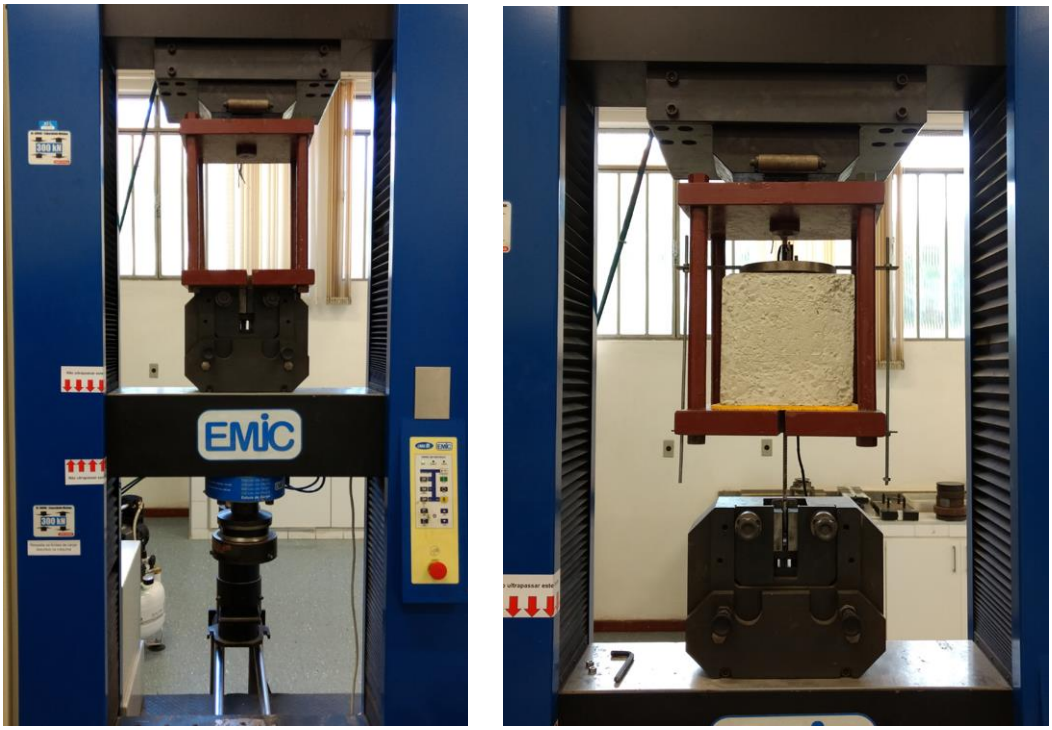


Figura 3.9 - Máquina universal com suporte de aço para ensaio

3.2.4.4. Tratamento estatístico dos dados

Para avaliação dos resultados obtidos na presente pesquisa, foi realizado um teste estatístico por meio da análise de variância com um fator; a ANOVA unidirecional. A descrição do teste estatístico encontra-se no Apêndice A.

A análise estatística foi realizada a fim de verificar se as médias das tensões últimas de aderência dos corpos de prova que utilizaram um concreto de mesma resistência à compressão e diferentes diâmetros de barras de aço são iguais estatisticamente. Por fim, para análise do comprimento de ancoragem modificado adotado nos ensaios de arrancamento, esse mesmo teste foi aplicado.

3.2.4.5. Cálculo do coeficiente de conformação superficial (η) considerando-se os ensaios de arrancamento

Os coeficientes de conformação superficial (η) das barras finas de aço adotadas nesta pesquisa foram determinados utilizando-se a eq. 3.2 de Carvalho *et al.* (2017), proposta a partir dos resultados obtidos em ensaios de arrancamento e baseada nas normas brasileira e francesa.

$$\eta = \psi_s = \sqrt{\frac{\tau_s}{f_{tj}}} \tag{3.2}$$

em que:
$\eta = \psi_s$ = coeficiente de conformação superficial;
τ_s = tensão de aderência, em MPa;
f_{tj} = resistência à tração do concreto, em MPa.

O valor da tensão de aderência (τ_s) utilizado na equação refere-se à tensão última de aderência obtida nos ensaios de arrancamento ($\tau_s = \tau_u$) e o da resistência à tração do concreto (f_{tj}) refere-se ao valor médio obtido nos ensaios de tração por compressão diametral ($f_{tj} = f_{ctm}$). Por fim, os resultados foram comparados aos valores prescritos na norma ABNT-NBR 7480 (2007), apresentados na Tab. 1.1.

3.2.4.6. Comparação entre valores experimentais e teóricos da tensão de aderência

Os resultados dos ensaios de arrancamento realizados nesta pesquisa foram comparados aos valores das resistências de aderência obtidos por meio da utilização de equações prescritas em normas.

Para cálculo da resistência máxima de aderência de acordo com o Model Code (2010), foi utilizada a eq. 2.2, apresentada anteriormente. Os valores adotados para a resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) foram 30 MPa e 60 MPa.

Para o cálculo da tensão teórica de aderência (f_b) segundo a ABNT-NBR 6118 (2014), realizado a partir das eq. 2.3 a 2.7 já apresentadas neste trabalho, foram utilizadas as eq. 3.3 e 3.4. Os valores adotados para a resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) foram 30 MPa e 60 MPa.

- para concretos de classes até C50:

$$f_b = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot 0{,}21 f_{ck}^{\,2/3} \tag{3.3}$$

- para concretos de classes C55 até C90:

$$f_b = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot 1{,}484 \ln\left(1 + 0{,}11 f_{ck}\right) \tag{3.4}$$

sendo:
f_b expresso em megapascal (MPa);
f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto, em MPa.

Importante ressaltar que não foram aplicados os coeficientes de segurança que devem ser adotados para os projetos de estruturas de concreto armado. A Tab. 3.4 apresenta, de forma resumida, as equações utilizadas neste trabalho.

Tabela 3.4 - Equações normativas para cálculo da tensão de aderência

Tensão última de aderência		
Referência	**Formulação**	**Unidade**
Model Code (2010)	$\tau_{máx} = 2{,}5\sqrt{f_{ck}}$	MPa
ABNT-NBR 6118 (2014)	Para concretos de classes até C50: $f_b = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot 0{,}21 f_{ck}^{\,2/3}$	MPa
	Para concretos de classes C55 até C90: $f_b = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot 1{,}484 \ln(1 + 0{,}11 f_{ck})$	MPa

4. Apresentação e Análise dos Resultados

Neste capítulo, serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais e dos ensaios de arrancamento realizados, assim como as análises dos dados. Para cálculo do erro associado aos valores médios dos resultados dos ensaios, foi utilizada a eq. 3.1 já apresentada no presente trabalho, considerando-se um nível de confiança de 95%.

4.1. Caracterização dos materiais

4.1.1. Agregados

A areia média apresentou a composição granulométrica e o módulo de finura indicados na Tab. 4.1.

Tabela 4.1 - Composição granulométrica da areia em estudo

Peneira - Abertura (mm)	Massa retida (g)		Porcentagem retida (%)			Porcentagem acumulada (%)
	M1	M2	M1	M2	Média	
2,36	4,71	5,53	0,94	1,11	1,0	1
1,18	33,02	34,15	6,62	6,84	6,7	8
0,6	143,40	145,72	28,73	29,20	29,0	37
0,3	181,61	176,06	36,39	35,28	35,8	73
0,15	111,08	107,96	22,25	21,63	21,9	94
Fundo	25,29	29,66	5,07	5,94	5,6	100
Total	499,11	499,08	100	100	100	-
Diâmetro máximo	2,4 mm					
Módulo de finura	2,13					

Na Fig. 4.1, tem-se a curva granulométrica da areia utilizada e os limites estipulados. Pode-se verificar que a areia média selecionada atende às especificações da norma ABNT-NBR 7211 (2009), uma vez que sua curva granulométrica encontra-se entre os limites inferior e superior estabelecidos pela mesma.

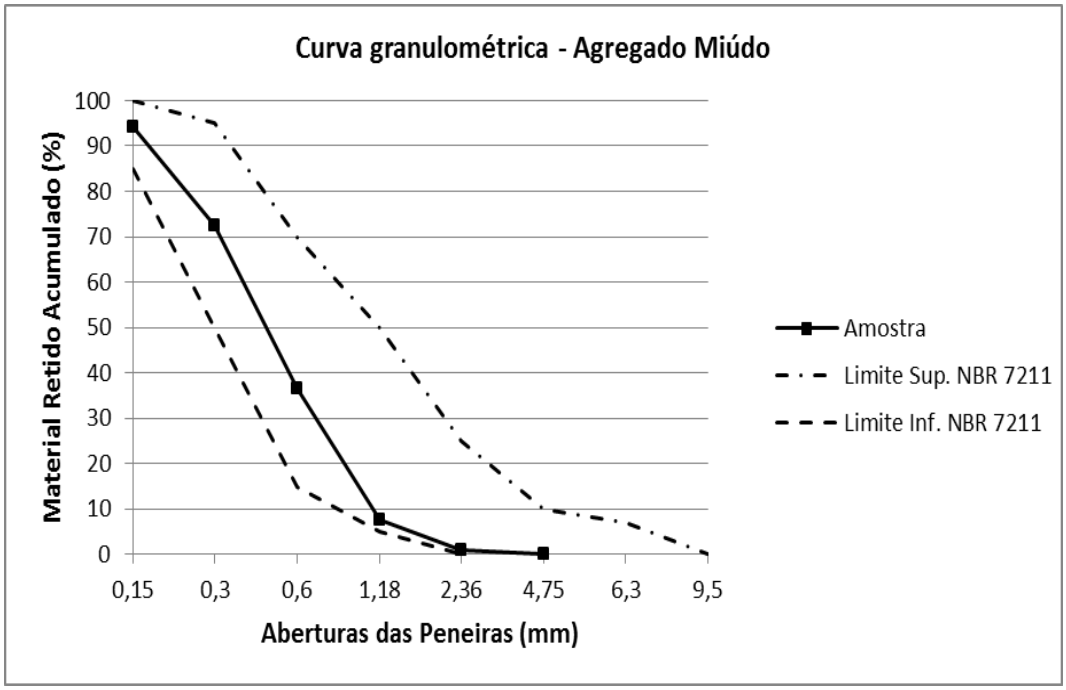


Figura 4.1 - Curva granulométrica da areia utilizada e limites da NBR 7211

O ensaio para determinação da massa específica da areia analisada gerou os resultados apresentados na Tab. 4.2.

Tabela 4.2 - Resultado do ensaio para determinação da massa específica da areia

Amostras	**Amostra 1**	**Amostra 2**
Massa (g)	500,04	500,01
Leitura no Frasco de Chapman (mL)	396,3	395,8
Massa específica (g/cm³)	2,547	2,554
	2,55	

Por meio dos ensaios realizados para a brita (efetuados pelo fornecedor), obteve-se massa específica seca de 2,68 g/cm³, módulo de finura de 5,99 e diâmetro máximo igual a 12,50 mm.

Na Fig. 4.2, tem-se a curva granulométrica (fornecida pela empresa) da brita utilizada e os limites estipulados. Pode-se verificar que a brita selecionada apresenta curva granulométrica dentro dos limites estabelecidos pela ABNT-NBR 7211 (2009).

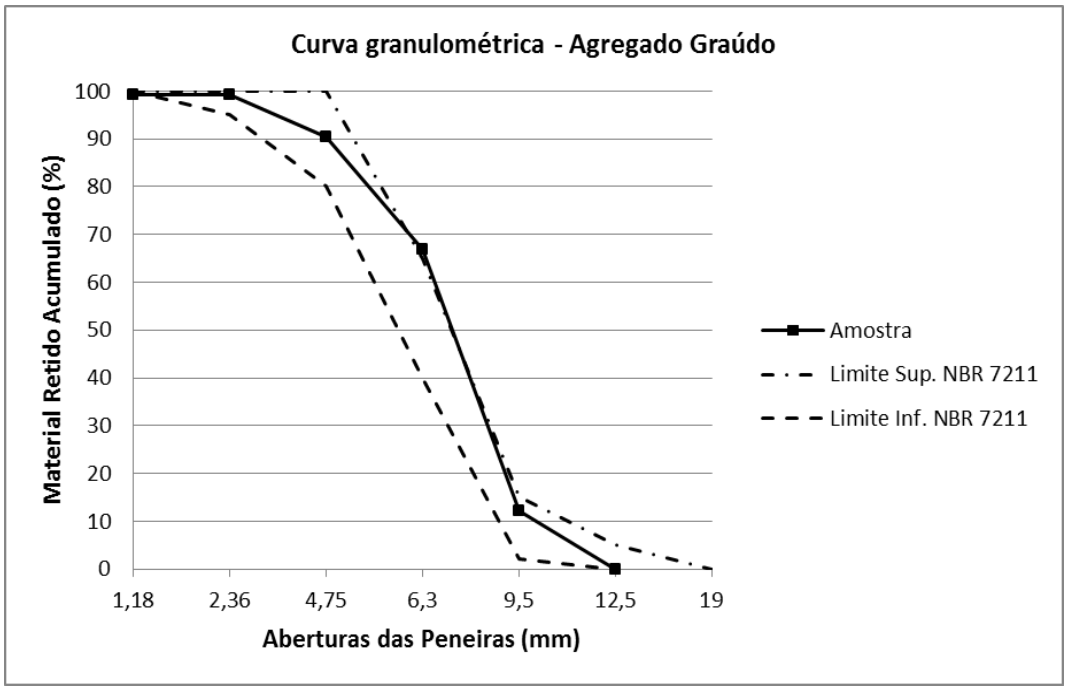


Figura 4.2 - Curva granulométrica da brita utilizada e limites da NBR 7211

4.1.2. Concreto

A caracterização do concreto foi realizada para cada betonada referente a cada diâmetro (6,3 mm, 8,0 mm e 10,0 mm), sendo efetuada no mesmo dia do ensaio de arrancamento do diâmetro correspondente. Os resultados desses ensaios foram apresentados na Tab. 4.3.

Tabela 4.3 - Resultados da caracterização do concreto

Ensaios de caracterização do concreto (28 dias)			
Classe	**Diâmetro da barra de aço (ϕ) (mm)**	**Resistência à compressão (MPa)**	**Resistência à tração (MPa)**
		f_{cm}	f_{ctm}
C30	6,3	35,7 ± 1,7	3,3 ± 0,1
	8,0	32,6 ± 1,0	2,0 ± 0,7
	10,0	32,2 ± 1,3	2,3 ± 0,6
C60	6,3	69,9 ± 7,9	4,4 ± 1,7
	8,0	66,2 ± 9,3	3,6 ± 1,9
	10,0	68,4 ± 2,2	4,4 ± 0,1

4.1.3. Barras de aço

Os resultados obtidos nos ensaios de tração das barras de aço de diâmetros iguais a 6,3 mm, 8,0 mm e 10,0 mm encontram-se na Tab. 4.4.

Tabela 4.4 - Resultado da caracterização das barras de aço CA-50

Diâmetro da barra de aço (mm)	**Módulo de elasticidade médio (E) (GPa)**	**Tensão de escoamento média (σ_e) (MPa)**
6,3	220 ± 14	662 ± 55
8,0	215 ± 6	612 ± 13
10,0	216 ± 6	560 ± 6

4.2. Ensaios de arrancamento

Neste tópico serão apresentados os valores máximos para a resistência de aderência e os referentes ao deslizamento de 0,1 mm obtidos nos ensaios de arrancamento. Os resultados foram calculados utilizando a fórmula da EN:10080 (2005), conforme eq. 2.1. Nos gráficos tensão de aderência *versus* deslizamento, os pontos referentes aos deslizamentos de 1,0 mm e 2,0 mm foram destacados para análise, uma vez que são apontados como deslizamentos de referência do Model Code (2010), considerando-se barras nervuradas, falha por arrancamento e boa condição de aderência. Na Tab. 4.5, são apresentados os resultados dos ensaios de arrancamento para os concretos da classe C30.

Nas Fig. 4.3 a 4.5, tem-se os gráficos da tensão de aderência *versus* deslizamento dos ensaios de arrancamento realizados para os concretos da classe C30.

Tabela 4.5 - Resultados para Ensaios de Arrancamento - Concreto C30

Ensaios de Arrancamento – Tensão de aderência – C30 (MPa)						
CPs	**Barras de 6,3 mm**		**Barras de 8,0 mm**		**Barras de 10,0 mm**	
	Serviço Δ=0,1mm	τ_u	**Serviço Δ=0,1mm**	τ_u	**Serviço Δ=0,1mm**	τ_u
CP1	2,6	9,4	3,4	6,8	2,4	8,4
CP2	2,9	11,8	3,0	7,4	3,6	11,1
CP3	4,3	13,2	2,6	9,6	2,9	8,3
CP4	2,4	8,3	4,5	6,6	2,7	7,5
CP5	4,1	9,6	2,3	5,6	2,6	11,6
CP6	4,0	9,0	2,9	7,0	2,4	7,6
Média	**3,4**	**10,2**	**3,1**	**7,2**	**2,8**	**9,1**
Desvio padrão	**0,8**	**1,9**	**0,8**	**1,3**	**0,5**	**1,8**
CV (%)	**-**	**18,4**	**-**	**18,8**	**-**	**19,8**
Resultado final de tensão	**3,4 ± 0,9**	**10,2 ±2,0**	**3,1 ± 1,0**	**7,2 ± 1,4**	**2,8 ± 0,5**	**9,1 ± 1,9**

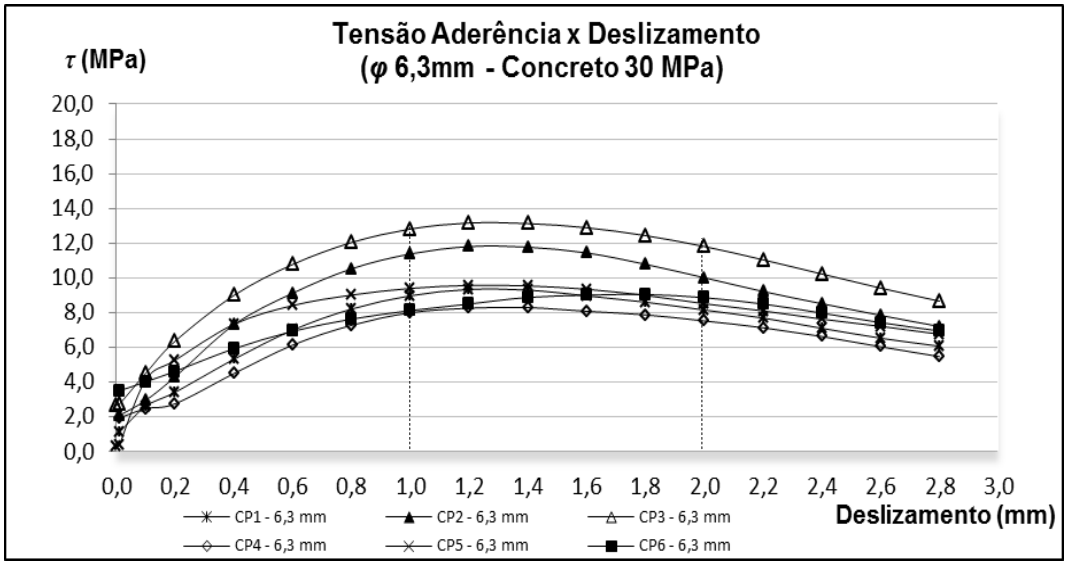


Figura 4.3 - Gráfico tensão *versus* deslizamento - Classe C30 - ϕ 6,3 mm

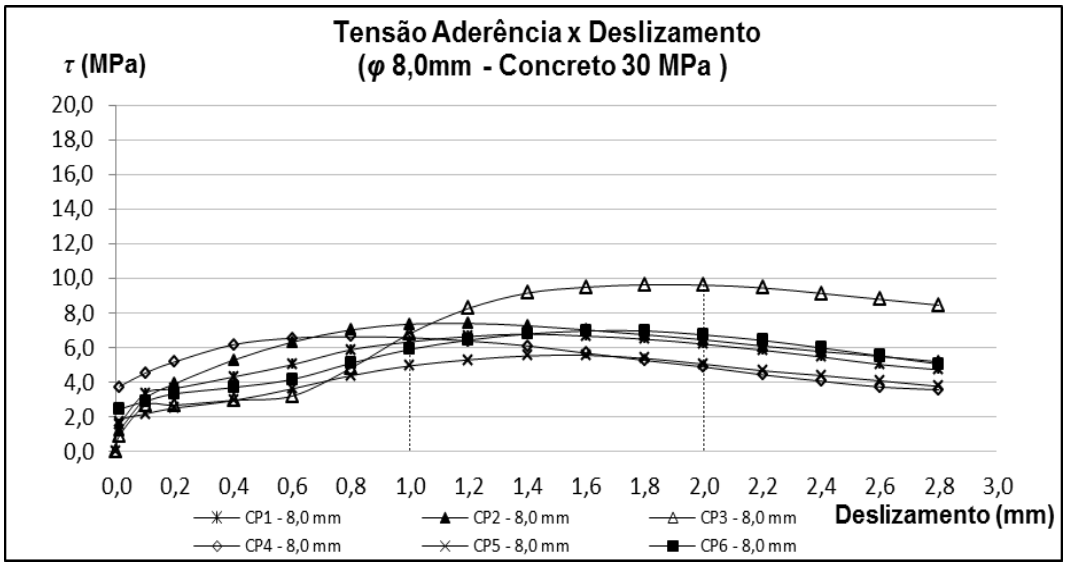


Figura 4.4 - Gráfico tensão *versus* deslizamento - Classe C30 - ϕ 8,0 mm

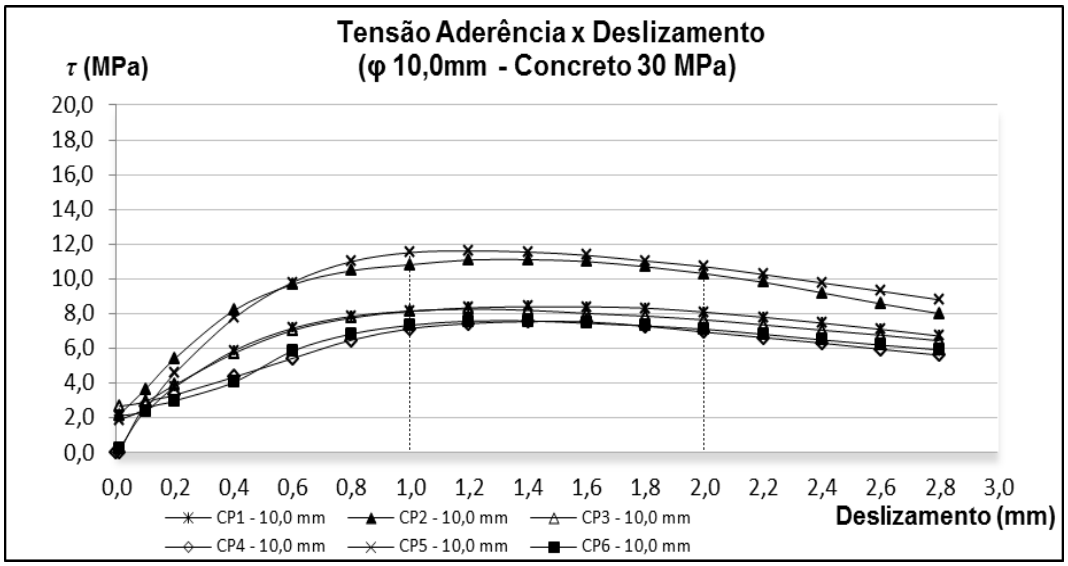


Figura 4.5 - Gráfico tensão *versus* deslizamento - Classe C30 - ϕ 10,0 mm

A Tab. 4.5 demonstra que os valores médios para a tensão última de aderência utilizando-se concreto da classe C30 e barras finas nos diâmetros 6,3 mm e 10,0 mm foram próximos. Para a barra de 8,0 mm, o valor médio da tensão última de aderência foi inferior, o que pode ter relação com a resistência à tração do concreto de valor inferior obtida nos ensaios utilizando esse diâmetro de barra (ver Tab. 4.3).

Realizando-se a análise de variância com um fator (ANOVA unidirecional), pode-se afirmar, para um nível de significância de 5% (α = 0,05), que as médias das tensões últimas de aderência utilizando-se concreto da classe C30 e barras

finas nos diâmetros 6,3 mm e 10,0 mm podem ser iguais ($F_{1,10}$ = 1,14, valor-p = 0,31 > 0,05). Utilizando-se as barras nos diâmetros 8,0 mm e 10,0 mm, também pode-se afirmar, para um nível de significância de 5% (α = 0,05), que as médias das tensões últimas de aderência podem ser iguais ($F_{1,10}$ = 4,28, valor-p = 0,07 > 0,05). Ao analisar as barras de 6,3 mm e 8,0 mm de diâmetro, o teste ANOVA afirma que há significativa diferença entre os valores ($F_{1,10}$ = 10,35, valor-p = 0,01 < 0,05) (para aplicações dos testes de normalidade de *Shapiro-Wilk* e ANOVA, ver Apêndices A e B).

Ressalta-se que os coeficientes de variação dos ensaios foram inferiores a 25%, o que, segundo Barbosa (2001), indica a aceitação das amostras. Importante observar, ainda, que todos os corpos de prova utilizados nos ensaios com concreto da classe C30 apresentaram falha por arrancamento da barra.

Na Tab. 4.6 são apresentados os resultados dos ensaios de arrancamento para os concretos da classe C60.

Tabela 4.6 - Resultados para Ensaios de Arrancamento - Concreto C60

Ensaios de Arrancamento – Tensão de aderência – C60 (MPa)						
CPs	**Barras de 6,3 mm**		**Barras de 8,0 mm**		**Barras de 10,0 mm**	
	Serviço Δ=0,1mm	τ_u	**Serviço Δ=0,1mm**	τ_u	**Serviço Δ=0,1mm**	τ_u
CP1	1,0	18,3	5,3	17,8	6,5	15,3
CP2	6,9	16,5	5,9	17,5	5,1	12,7
CP3	6,5	16,1	4,3	18,0	6,2	18,0
CP4	6,2	18,0	9,6	17,5	10,0	18,7
CP5	3,5	18,2	14,6	18,8	9,7	18,3
CP6	4,0	15,7	10,1	17,8	8,3	18,2
Média	**4,7**	**17,2**	**8,3**	**17,9**	**7,6**	**16,8**
Desvio padrão	**2,3**	**1,2**	**3,9**	**0,5**	**2,0**	**2,4**
CV (%)	**-**	**6,8**	**-**	**2,7**	**-**	**14,2**
Resultado final de tensão	**4,7 ± 2,4**	**17,2 ±1,2**	**8,3 ± 4,1**	**17,9 ±0,5**	**7,6 ± 2,1**	**16,8 ±2,5**

Nas Fig. 4.6 a 4.8, tem-se os gráficos da tensão de aderência *versus* deslizamento dos ensaios de arrancamento realizados para os concretos da classe C60.

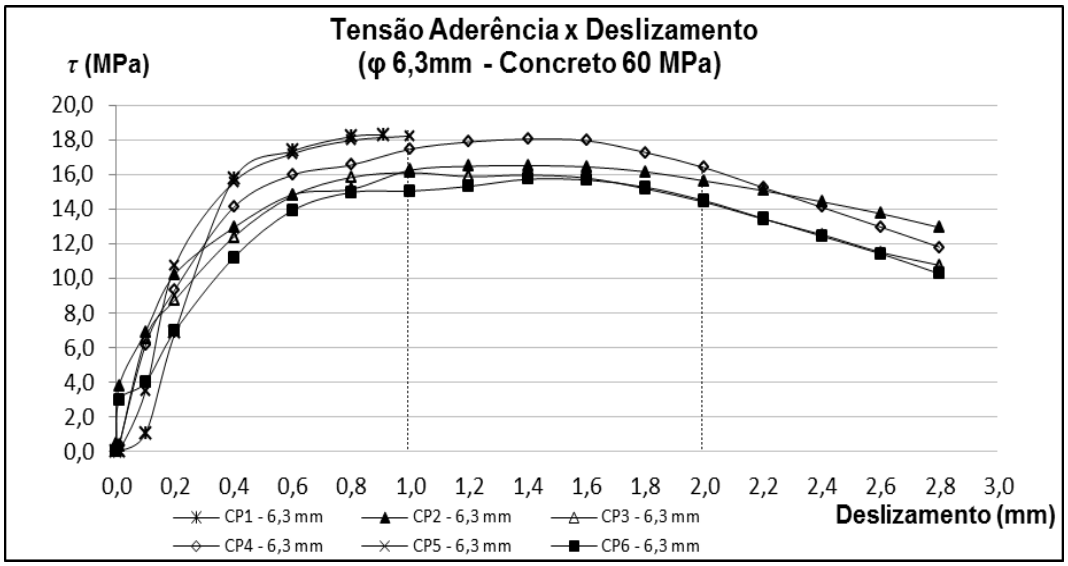


Figura 4.6 - Gráfico tensão *versus* deslizamento - Classe C60 - ϕ 6,3 mm

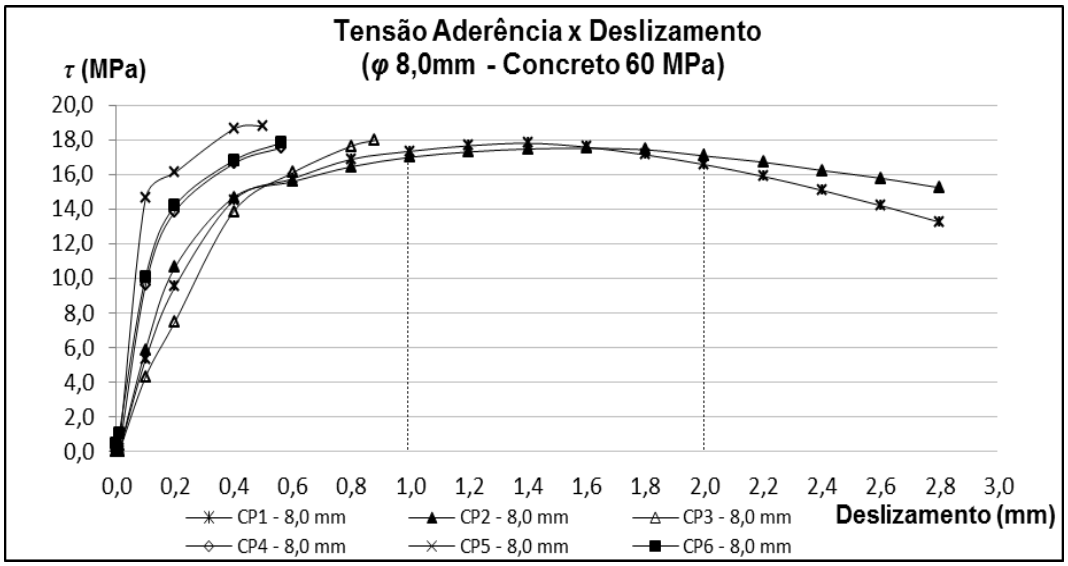


Figura 4.7 - Gráfico tensão *versus* deslizamento - Classe C60 - ϕ 8,0 mm

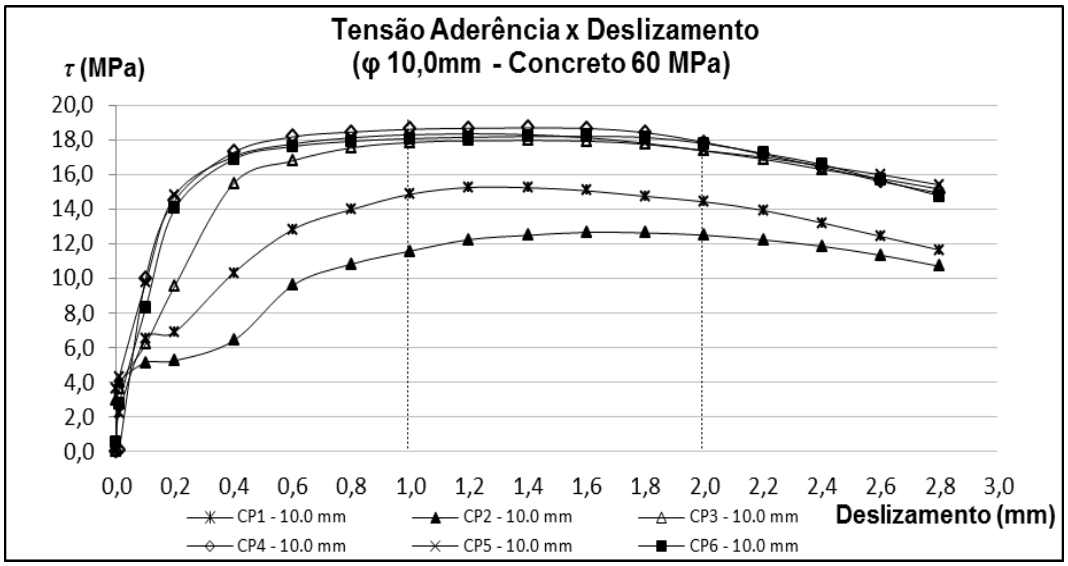


Figura 4.8 - Gráfico tensão *versus* deslizamento - Classe C60 - ϕ 10,0 mm

A Tab. 4.6 demonstra que os valores para a tensão última de aderência utilizando-se concreto da classe C60 e barras finas foram muito próximos. Realizando-se a análise de variância com um fator (ANOVA unidirecional), pode-se afirmar, para um nível de significância de 5% (α = 0,05), que não há significativa diferença entre as médias das tensões últimas de aderência utilizando-se concreto da classe C60 e barras finas nos diâmetros 6,3 mm e 8,0 mm ($F_{1,10}$ = 2,10, valor-p = 0,18 > 0,05), ou barras nos diâmetros 6,3 mm e 10,0 mm ($F_{1,10}$ = 0,08, valor-p = 0,78 > 0,05), ou barras nos diâmetros 8,0 mm e 10,0 mm ($F_{1,10}$ = 1,12, valor-p = 0,31 > 0,05) (para aplicações dos testes de normalidade de *Shapiro-Wilk* e ANOVA, ver Apêndices A e B).

Ressalta-se que os coeficientes de variação dos ensaios foram inferiores a 25%, o que, segundo Barbosa (2001), indica a aceitação dos resultados obtidos. Importante salientar, também, que para os ensaios utilizando concreto da classe C60 e barras de 6,3 mm de diâmetro, os corpos de prova CP1 e CP5 apresentaram escoamento da barra. Para os ensaios com barras de 8,0 mm de diâmetro, o mesmo foi verificado para os corpos de prova CP3, CP4, CP5 e CP6. No entanto, observa-se que o escoamento ocorreu em uma tensão próxima à de ruptura da aderência aço-concreto dos corpos de prova em que não houve o escoamento da barra. Dessa forma, as tensões obtidas nesses corpos de prova não foram desconsideradas.

Os gráficos das Fig. 4.3 a 4.7 demonstram que, em sua maioria, as curvas para as séries mostram-se homogêneas. Analisando-se os gráficos, pode-se verificar que, em geral, as tensões últimas de aderência ocorreram em um deslizamento próximo a 1,0 mm. Observa-se, ainda, uma pequena variação na tensão de aderência entre os deslizamentos de 1,0 mm e 2,0 mm, conforme apontado no Model Code (Fig. 2.7), demonstrando uma semelhança entre o comportamento da aderência nos ensaios e o prescrito na norma.

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios, conclui-se que a tensão última de aderência tende a aumentar quando a resistência à compressão do concreto aumenta. Esse mesmo comportamento foi observado nos estudos de Al-Shannag e Charif (2017), Wardeh *et al.* (2017), Zaini-Rijal e Rahman (2017), Shen *et al.* (2016), Arel e Yazici (2012), Almeida Filho *et al.* (2008) e Zhu *et al.* (2004), os quais analisaram a aderência entre o concreto e barras de diâmetros iguais ou superiores a 10,0 mm. Barbosa (2001), que abordou barras de diâmetros inferiores, iguais e superiores a 10,0 mm, também chegou à mesma conclusão. Portanto, conclui-se que as barras finas apresentam um comportamento semelhante ao das barras de diâmetros superiores no que diz respeito ao aumento da resistência à compressão do concreto.

4.2.1. Resistência de aderência *versus* diâmetro das barras

A Fig. 4.9 apresenta o gráfico resistência máxima de aderência *versus* diâmetro das barras nervuradas utilizadas nos ensaios.

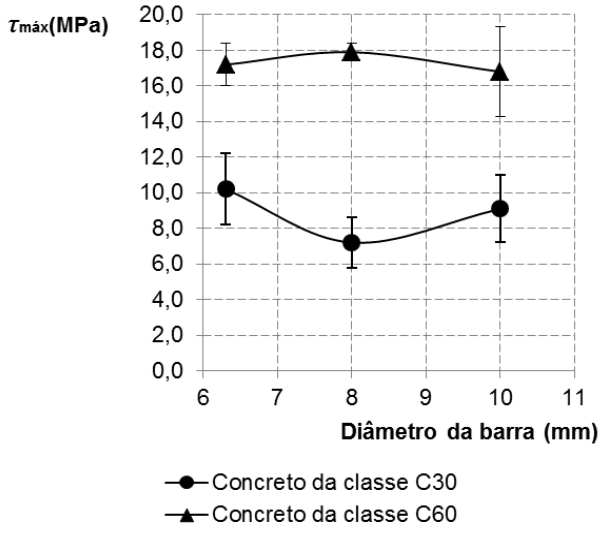


Figura 4.9 - Gráfico resistência máx. de aderência *versus* diâmetro da barra

De acordo com a ABNT-NBR 7480 (2007) (ver Tab. 1.1), armaduras de diâmetros inferiores a 10,0 mm apresentam um comportamento de aderência semelhante, independente do diâmetro. Essa teoria pôde ser confirmada para o concreto de alta resistência, uma vez que o teste ANOVA afirmou que as médias das tensões úlltimas de aderência utilizando-se concreto da classe C60 podem ser iguais, independente do diâmetro da barra utilizada. O mesmo não pôde ser verificado para o concreto convencional, já que o teste apontou significativa diferença entre as médias das tensões úlltimas de aderência utilizando-se barras de 6,3 mm e 8,0 mm de diâmetro.

O comportamento observado para a tensão última de aderência do concreto de alta resistência ao variar o diâmetro da barra de aço não apresentou uma boa concordância com a maioria dos trabalhos da literatura, os quais apresentaram redução no valor da resistência máxima de aderência com o aumento do diâmetro da barra, como as pesquisas de Al-Shannag e Charif (2017), Zaini-Rijal e Rahman (2017), Kaffetzakis e Papanicolaou (2016), Pop *et al.* (2013), Zhu *et al.* (2004) e Fernandes e El Debs (2000). Entretanto, esses trabalhos abordaram barras de diâmetros iguais ou superiores a 10,0 mm. Dessa forma, os resultados desta pesquisa não estão contrariando a literatura e evidenciam a importância de se estudar o comportamento das barras finas de aço com concretos convencional e de alta resistência. Importante salientar que os concretos de alta resistência foram abordados na última revisão da norma de projeto de estruturas de concreto armado realizada em 2014 (ABNT-NBR 6118).

4.2.2. Cálculo do coeficiente de conformação superficial (η) considerando-se os ensaios de arrancamento

Na Tab. 4.7 são apresentados os resultados dos coeficientes de conformação superficial das barras finas utilizadas nos ensaios desta pesquisa, sendo obtidos por meio da eq. 3.2 proposta por Carvalho *et al.* (2017). Os valores utilizados para as variáveis τ_s e f_{tj} foram obtidos por meio dos ensaios de arrancamento ($\tau_s = \tau_u$) e de tração por compressão diametral ($f_{tj} = f_{ctm}$), respectivamente.

De acordo com a Tab. 4.7, pode-se verificar que os valores obtidos são superiores ao mínimo estipulado pela ABNT-NBR 7480 (2007) (Tab. 1.1), o que indica um ganho de desempenho. Em geral, observa-se que a diferença entre os resultados obtidos para o coeficiente de conformação superficial das barras finas

de aço é pequena, apresentando valores próximos para todas as séries, independente do diâmetro da barra ou da resistência à compressão do concreto. Esses valores têm boa concordância com os apresentados por Carvalho *et al.* (2017) para barras de mesmos diâmetros e conformação superficial, independente da resistência à compressão do concreto.

Tabela 4.7 - Coeficiente de conformação superficial das barras (η)

Barras nervuradas				
Classe do concreto	ϕ **(mm)**	$\tau_s = \tau_u$ **(MPa)**	$f_{tj} = f_{ctm}$ **(MPa)**	$\eta = \psi_s$
C30	6,3	10,2	3,3	1,8
	8,0	7,2	2,0	1,9
	10,0	9,1	2,3	2,0
C60	6,3	17,2	4,4	2,0
	8,0	17,9	3,6	2,2
	10,0	16,8	4,4	2,0

Na Fig. 4.10 tem-se os coeficientes de conformação superficial (η) das barras finas de aço utilizadas nos ensaios de arrancamento desta pesquisa, assim como o valor de referência apresentado na ABNT-NBR 7480 (2007) (η=1,0).

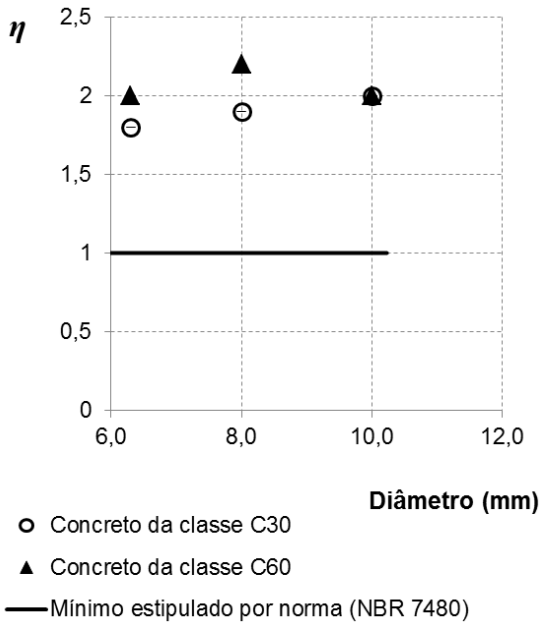


Figura 4.10 - Coeficientes de conformação superficial (η) obtidos nos ensaios

4.2.3. Análise do comprimento de ancoragem adotado nos ensaios

Para análise do comprimento de ancoragem adotado de 10ϕ, levou-se em conta os resultados obtidos para cada corpo de prova utilizado nos ensaios de arrancamento para o concreto da classe C30 deste trabalho e os obtidos na pesquisa realizada por França (2010), que utilizou um comprimento de ancoragem de 5ϕ, mesmo tipo de barra e concreto com resistência à compressão próxima à utilizada neste estudo. Os valores médios das tensões últimas de aderência dos corpos de prova ensaiados na pesquisa de França (2010) são apresentados na Tab. 4.8.

Tabela 4.8 - Resultados dos ensaios de França (2010) - 5ϕ

	Tensão Última de Aderência		
Aço CA-50	**Média (MPa)**	**Desvio Padrão (MPa)**	**Coef. Variação (%)**
barras 6,3 mm	6,9	1,6	23
barras 8,0 mm	6,5	0,8	12
barras 10,0 mm	10,6	0,7	7

Fonte: França, 2010.

Na Tab. 4.9 são apresentados os valores médios das tensões últimas de aderência dos corpos de prova ensaiados na presente pesquisa, a qual utilizou um comprimento de ancoragem de 10ϕ e concreto da classe C30.

Tabela 4.9 - Resultados dos ensaios de arrancamento - Classe C30 - 10ϕ

	Tensão Última de Aderência		
Aço CA-50	**Média (MPa)**	**Desvio Padrão (MPa)**	**Coef. Variação (%)**
barras 6,3 mm	10,2	1,9	18
barras 8,0 mm	7,2	1,3	19
barras 10,0 mm	9,1	1,8	20

Realizando-se a análise de variância com um fator (ANOVA unidirecional) a partir dos resultados de cada corpo de prova ensaiado, pode-se afirmar, para um nível de significância de 5% (α = 0,05), que as médias das tensões últimas de aderência utilizando-se barras de 8,0 mm e 10,0 mm de diâmetro e diferentes comprimentos de ancoragem podem ser iguais (8,0 mm: $F_{1,9}$ = 1,07, valor-p = 0,33 > 0,05 e 10,0 mm: $F_{1,9}$ = 2,91, valor-p = 0,12 > 0,05). Para barras de

6,3 mm de diâmetro, o teste ANOVA afirma que há significativa diferença entre as médias das tensões últimas de aderência utilizando-se diferentes comprimentos de ancoragem ($F_{1,9}$ = 9,28, valor-p = 0,01 < 0,05), apresentando um valor superior quando utilizado 10ϕ (para aplicações dos testes de normalidade de *Shapiro-Wilk* e ANOVA, ver Apêndices A e B).

Alguns autores, como Pop *et al.* (2013) e Kaffetzakis e Papanicolaou (2016), citam que, ao aumentar o comprimento de ancoragem, a tensão última de aderência poderia diminuir. Esses autores pesquisaram a aderência em barras com diâmetros maiores ou iguais a 10,0 mm. No entanto, neste trabalho, não foi possível verificar se a alteração no comprimento de ancoragem influencia ou não na tensão última de aderência utilizando-se barras finas e concreto convencional.

A alteração no comprimento de ancoragem foi realizada com a intenção de reduzir a variabilidade dos resultados, uma vez que pesquisas anteriores afirmaram que esse poderia ser o parâmetro responsável pelo alto valor do coeficiente de variação. Porém, a partir dos resultados apresentados nas Tab. 4.8 e 4.9, pôde-se observar a redução do coeficiente de variação apenas para as barras de 6,3 mm de diâmetro. No entanto, em ambos os estudos, os valores dos coeficientes de variação dos ensaios foram inferiores a 25%, o que, segundo Barbosa (2001), indica a aceitação dos resultados obtidos.

4.2.4. Comparação entre valores experimentais e teóricos da tensão de aderência

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios de arrancamento, observa-se que a tensão última de aderência aumenta com o aumento da resistência à compressão do concreto. Para comparação dos valores experimentais com os obtidos por meio da ABNT-NBR 6118 (2014), foram utilizadas as tensões de aderência referentes ao deslizamento de 0,1 mm (serviço), uma vez que as equações da norma brasileira referem-se às tensões para esse deslizamento. Para comparação com o Model Code (2010), foram utilizados os valores experimentais da tensão última de aderência, já que a equação da norma refere-se à resistência máxima. Na Tab. 4.10, tem-se os valores obtidos nos ensaios e os calculados segundo as equações apresentadas na Tab. 3.4.

Tabela 4.10 - Comparação entre valores experimentais e teóricos

Classe do concreto	Diâmetro das barras (mm)	Tensão de aderência (MPa)			
		Experimental	Teórica	Experimental	Teórica
		Serviço Δ=0,1mm	ABNT-NBR 6118 (2014)	Tensão última de aderência (τ_u)	Model Code (2010)
C30	6,3	3,4 ± 0,9	4,6	10,2 ± 2,0	13,7
	8,0	3,1 ± 1,0		7,2 ± 1,4	
	10,0	2,8 ± 0,5		9,1 ± 1,9	
C60	6,3	4,7 ± 2,4	6,8	17,2 ± 1,2	19,4
	8,0	8,3 ± 4,1		17,9 ± 0,5	
	10,0	7,6 ± 2,1		16,8 ± 2,5	

Por meio da análise dos resultados apresentados na Tab. 4.10, observa-se que, para o concreto convencional, os valores experimentais apresentaram-se inferiores ao obtido segundo a equação da ABNT-NBR 6118 (2014). Para concreto de alta resistência, a tensão de aderência obtida por meio da equação da norma apresentou-se superior à encontrada experimentalmente para a barra de 6,3 mm de diâmetro e inferior às verificadas para as barras de 8,0 mm e 10,0 mm. Ressalta-se que não foram utilizados coeficientes de segurança para cálculo dos valores apresentados e que as tensões de aderência experimentais referentes ao deslizamento de 0,1 mm apresentaram grande variabilidade. A diferença entre os valores experimentais e teóricos pode se dar ao fato da norma não considerar o diâmetro da barra fina de aço nas equações.

Utilizando-se a equação proposta no Model Code (2010), tem-se valores superiores aos encontrados nos ensaios, principalmente para concretos com resistência à compressão de 30 MPa. Importante salientar que as resistências à tração dos concretos das classes C30 e C60 apresentaram valores baixos e que para alguns corpos de prova ensaiados houve o escoamento da barra um pouco antes ou simultaneamente à ruptura da aderência. Além disso, outro fator que provavelmente pode ter contribuído para a diferença entre os valores experimentais e teóricos refere-se à utilização de um comprimento de ancoragem superior ao proposto na norma, o que tende a produzir resultados de tensão de aderência inferiores aos obtidos por meio do Model Code (2010).

Todos os corpos de prova dos ensaios apresentaram ruptura por arrancamento. Dessa forma, estão de acordo com as expressões normativas que representam a ruptura por arrancamento da barra e não por fendilhamento.

5. Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Os objetivos inicialmente propostos foram alcançados, sendo possível determinar e analisar as resistências máximas de aderência e os coeficientes de conformação superficial utilizando-se barras nervuradas finas de aço (6,3 mm, 8,0 mm e 10,0 mm) e concretos de duas classes (C30 e C60). A partir desses dados, foi possível analisar a influência de determinados parâmetros como o diâmetro da barra, a resistência à compressão do concreto e o comprimento de ancoragem na tensão última de aderência e comparar dados experimentais com teóricos.

Observou-se que as médias das tensões últimas de aderência para os corpos de prova que utilizaram concreto de alta resistência e diferentes diâmetros de barras podem ser iguais; ou seja, o diâmetro da barra fina de aço não teria influenciado na resistência máxima de aderência para esse tipo de concreto. O mesmo não pôde ser confirmado para o concreto convencional, que apresentou significativa diferença entre as médias das tensões úlltimas de aderência utilizando-se barras de 6,3 mm e 8,0 mm de diâmetro. Sugere-se, em pesquisas futuras, que sejam realizados ensaios utilizando barras finas com diferentes conformações superficiais (entalhadas e lisas) das abordadas neste estudo, a fim de possibilitar a confirmação dos resultados.

De acordo com os dados dos ensaios de arrancamento, há um aumento da tensão última de aderência à medida que a resistência à compressão do concreto aumenta.

Em relação à determinação dos coeficientes de conformação superficial das barras finas utilizando-se os dados dos ensaios de arrancamento, os resultados obtidos apresentaram valores próximos, independente do diâmetro da barra ou da classe de concreto. Esses coeficientes apresentaram-se superiores ao mínimo estipulado na ABNT-NBR 7480 (2007), indicando um ganho de desempenho.

Quanto ao comprimento de ancoragem modificado adotado, observou-se que, para o estudo com barras finas, não houve significativa diferença entre as médias das tensões últimas de aderência para as barras de 8,0 mm e 10,0 mm de diâmetro ao utilizar diferentes comprimentos de ancoragem. Já para as barras

de 6,3 mm, os resultados indicaram maior tensão última de aderência utilizando-se 10ϕ. Dessa forma, não foi possível concluir se a alteração no comprimento de ancoragem interfere na resistência máxima de aderência utilizando-se barras finas e concreto convencional. Sugere-se, em pesquisas futuras, que sejam realizados novos ensaios utilizando-se os mesmos tipos e diâmetros de aço e diferentes comprimentos de ancoragem, para que se obtenha alguma conclusão a respeito desse parâmetro.

Analisando-se os coeficientes de variação (CV) dos resultados ao alterar o comprimento de ancoragem, pôde-se observar a redução do CV apenas para as barras de 6,3 mm de diâmetro. Sugere-se a realização de mais ensaios utilizando-se barras finas e outros comprimentos de ancoragem, a fim de verificar a influência desse parâmetro no CV dos resultados dos ensaios de arrancamento.

Comparando-se os valores das tensões últimas de aderência experimentais com os obtidos segundo as equações prescritas nas normas, observou-se que o concreto convencional apresentou valores experimentais inferiores ao obtido segundo a equação da ABNT-NBR 6118 (2014). Já para o concreto de alta resistência, o valor da tensão teórica da aderência apresentou-se superior ao encontrado experimentalmente para a barra de 6,3 mm de diâmetro e inferior aos obtidos para as barras de 8,0 mm e 10,0 mm. Ressalta-se que há uma grande variabilidade nos resultados dos ensaios. A diferença entre os valores experimentais e teóricos pode se dar ao fato da norma não considerar o diâmetro da barra fina de aço nas equações.

Utilizando-se a equação do Model Code (2010), tem-se valores superiores aos experimentais, principalmente para o concreto convencional. Entre as prováveis causas da diferença entre os valores experimentais e teóricos tem-se: as resistências à tração dos concretos de ambas as classes apresentaram valores baixos, houve o escoamento da barra de aço de alguns corpos de prova um pouco antes ou simultaneamente à ruptura da aderência e foi utilizado um comprimento de ancoragem superior ao proposto na norma, levando a resultados de tensão de aderência inferiores aos calculados segundo o Model Code (2010).

6. Referências

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Bond and development of straight reinforcing bars in tension. **ACI Committee 408**, ACI 408R-03, 2003: 49 p.

ALMEIDA FILHO, Fernando Menezes; EL DEBS, Mounir K.; EL DEBS, Ana Lúcia H. C. Bond-slip behavior of self-compacting concrete and vibrated concrete using pull-out and beam tests. **Materials and Structures**, 41, p.1073-1089, 2008.

AL-SHANNAG, Mohammad Jamal; CHARIF, Abdelhamid. Bond behavior of steel bars embedded in concretes made with natural lightweight aggregates. **Journal of King Saud University – Engineering Sciences**, 29, p.365-372, 2017.

ANGST, Ueli M.; GEIKER, Mette R.; MICHEL, Alexander; GEHLEN, Christoph; WONG, Hong; ISGOR, O. Burkan; ELSENER, Bernhard; HANSSON, Carolyn M.; FRANÇOIS, Raoul; HORNBOSTEL, Karla; POLDER, Rob; ALONSO, Maria Cruz; SANCHEZ, Mercedes; CORREIA, Maria João; CRIADO, Maria; SAGÜÉS, A.; BUENFELD, Nick. The steel–concrete interface. **Materials and Structures**, 50:143, 2017.

AREL, H. Ş. e YAZICI, Ş. Concrete–reinforcement bond in different concrete classes. **Construction and Building Materials**, 36, p.78-83, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-5738**. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-5739**. Concreto – Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-6118**. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-6892-1.** Materiais metálicos – Ensaio de Tração – Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-7211.** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-7222.** Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-7477.** Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-7480.** Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-9776.** Agregados - Determinação da massa específica Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM-53.** Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM-248.** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BARBOSA, Maria Teresa Gomes. **Avaliação do Comportamento da Aderência em Concretos de Diferentes Classes de Resistência.** 2001. 144f. Tese (Título de Doutor em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Rio de Janeiro.

CARVALHO, Eliene Pires; FERREIRA, Efigênia Guariento; DA CUNHA, José Celso; RODRIGUES, Conrado de Souza; MAIA, Nilton da Silva. Experimental investigation of steel-concrete bond for thin reinforcing bars. **Latin American Journal of Solids and Structures**, 14, p.1932-1951, 2017.

CEB-FIP. Model Code: First Complete Draft. v.1. **International Federation for Structural Concrete** (*fib*): Lausanne, Switzerland, 2010, 292 p.

COÊLHO, Lavínia de Vasconcelos Xavier; PONTES, Ronaldo B.; MONTEIRO, Eliana C. B.; HELENE, Paulo. Avaliação das resistências mecânicas do concreto à tração frente a variados traços e fatores água/cimento. **47º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2005**, 2005, Olinda. Anais do 47 Congresso Brasileiro do Concreto CBC2005. IBRACON, 2005. v.VI. p.15 – 22.

DONZA, H.; CABRERA, O.; IRASSAR, E. F. High-strength concrete with different fine aggregate. **Cement and Concrete Research**, 32, p.1755-1761, 2002.

DUMÊT, Tatiana Bittencourt. **Aderência de cordoalhas em concretos de alta resistência com e sem fibras de aço.** 2003. 474f. Tese de doutorado - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.

EN:1992-1-1. **Eurocode 2: Design of concrete structures** - Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2004.

EN:10080. **Steel for reinforcement of concrete** - Weldable reinforcing steel - General, 2005.

FERNANDES, Rejane Martins; EL DEBS, Ana Lúcia H. de Cresce. A influência das ações repetidas na aderência aço-concreto. **IV Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto**. São Carlos, SP, 2000.

FRANÇA, Marcela Bruna Braga. **Estudo Experimental da Aderência Aço-Concreto para Barras Finas de Aço CA-50.** 2010. 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Belo Horizonte.

GARCIA-TAENGUA, Emilio; MARTÍ-VARGAS, Jose Rocio; SERNA, P. Bond of reinforcing bars to steel fiber reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, 105, p.275-284, 2016.

KAFFETZAKIS, Michael I.; PAPANICOLAOU, Catherine G. Bond behavior of reinforcement in lightweight aggregate self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, 113. p.641-652. Jun 2016.

LARSON, Ron; FARBER, Betsy. **Estatística Aplicada**. São Paulo: Pearson, 2010.

LEONHARDT, Fritz; MÖNNIG. Eduard. **Construções de Concreto:** Princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado. Rio de Janeiro: Livraria Interciência, v.1, 1977.

MIRANDA, Marcela Palhares; CARVALHO, Eliene Pires. Avaliação do comprimento de ancoragem de barras de aço em ensaios de arrancamento. **59º Congresso Brasileiro do Concreto 59CBC2017**. Bento Gonçalves, RS 2017.

MONTOYA, P. Jimenez; MESEGUER, A. Garcia e CABRE, F. Moran **Hormigon Armado.** Barcelona: Editorial Gustavo Gili, S.A., 1974.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do concreto.** Tradução Salvador E. Giammusso. 2ª edição. São Paulo: PINI, 1997.

ÖZTURAN, Turan; ÇEÇEN, Cengizhan. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 2, p. 165-170, 1997.

POKORNY, Petr; KOURIL, Milan; STOULIL, Jan; BOUSKA, Petr; SIMON, Pavel; JURANEK, Pavel. Problems and normative evaluation of bond-strength tests for coated reinforcement and concrete. **Materials and technology**, 49(6), p.847-856, 2015.

POMPEU NETO, Bernardo Borges. **Efeitos do tipo, tamanho e teor de agregado graúdo na resistência e energia da fratura do concreto.** 2004. Tese de Doutorado – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Comissão de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Campinas.

POP, Ioan; SCHUTTER, Geert De; DESNERCK, Pieter; ONET, Traian. Bond between powder type self-compacting concrete and steel reinforcement. **Construction and Building Materials**, 41, p.824-833, 2013.

PORTAL ACTION. **Teste de Shapiro-Wilk**. Disponível em: <http://www.portalaction.com.br/inferencia/64-teste-de-shapiro-wilk>. Acesso em 29 maio 2017.

REHM, G. **The Basic Principles of the Bond Between Steel and Concrete**. Cement and Concrete Association Library Translation n.134 (Über die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 138, p.59, 1961), 1968.

ROS, Soty; SHIMA, Hiroshi. Relationship between splitting tensile strength and compressive strength of concrete at early age with different types of cement and curing temperature histories. Kochi University of Technology. **13th Annual Convention of Japan Concrete Institute**, v.35, n.1, p.427-432, 2013.

ROSALES, Yadian Menéndez; FARFÁN, Raúl Darío Durand; BARBOSA, Wallison Carlos de Sousa; BEZERRA, Luciano Mendez. Efeito da forma na resistência de aderência aço-concreto. **58º Congresso Brasileiro do Concreto 58CBC2016**. Belo Horizonte, MG 2016.

SHEN, Dejian; SHI, Xiang; ZHANG, Hui; DUAN, Xiaofang; JIANG, Guoqing. Experimental study of early-age bond behavior between high strength concrete and steel bars using a pull-out test. **Construction and Building Materials**, 113, p.653-663, 2016.

TASTANI, S. P.; PANTAZOPOULOU, S. J.. Direct Tension Pullout Bond Test: Experimental Results. **Journal of Structural Engineering**, 136, p.731-743, jun. 2010.

VALCUENDE, M. e PARRA, C. Bond behaviour of reinforcement in self-compacting concretes. **Construction and Building Materials**, 23, p.162-170, 2009.

WARDEH, George; GHORBEL, Elhem; GOMART, Hector; FIORIO, Bruno. Experimental and analytical study of bond behavior between recycled aggregate concrete and steel bars using a pullout test. **Structural Concrete**, 18, p.811-825, 2017.

WU, Ke-Ru; CHEN, Bing; YAO, Wu; ZHANG, Dong. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, 31, p.1421-1425, 2001.

ZAINI-RIJAL, Zuraida; RAHMAN, Ahmad Baharuddin Abd. A comparative bond study of deformed steel bar in different concrete grades and concrete fiber. **Journal of Engineering and Applied Sciences**, 12(12), p.3072-3076, 2017.

ZHU, W.; SONEBI, M.; BARTOS, P. J. M. Bond and interfacial properties of reinforcement in self-compacting concrete. **Materials and Structures**, 37, p.442-448, 2004.

APÊNDICE A - Teste ANOVA unidirecional

TEORIA

Segundo Larson e Farber (2010), para a realização de um teste da variância com um fator, tem-se:

a) hipótese nula H_0: hipótese estatística que afirma que todas as médias populacionais são iguais;
b) hipótese alternativa H_a: hipótese que afirma que pelo menos uma das médias é diferente (LARSON e FARBER, 2010).

A ANOVA unidirecional pode ser realizada se obedecidas as seguintes condições: a amostra deve ser oriunda de uma população normal ou aproximadamente normal, cada população deve ter a mesma variância e as amostras devem ser independentes entre si (LARSON e FARBER, 2010).

Para utilização desse teste de hipóteses, deve-se verificar se as amostras são de populações que seguem distribuição normal. Para a presente pesquisa, foi aplicado o teste de normalidade de *Shapiro-Wilk*, descrito no Apêndice B.

Segundo Larson e Farber (2010), para realização da análise simples do teste de variância de um fator, deve-se:

a) determinar as hipóteses nula e alternativa (H_0 e H_a);
b) definir o nível de significância (α), os graus de liberdade do numerador e do denominador ($g.l._N$ e $g.l._D$) e identificar o valor crítico ($F_{crítico}$) utilizando a tabela do Anexo B. A partir desse valor, deve-se determinar a região de rejeição;
c) calcular a estatística de teste;
d) tomar a decisão entre rejeitar ou não a hipótese nula e interpretar a decisão (LARSON e FARBER, 2010).

Uma vez as condições necessárias à aplicação do teste estejam em conformidade, tem-se uma distribuição de amostragem aproximada pela distribuição F. Para cálculo da estatística de teste, utiliza-se a eq. A.1:

$$F = \frac{MS_B}{MS_W} \qquad \text{(A.1)}$$

em que:

MS_B = variância entre as amostras;

MS_W = variância dentro das amostras.

O cálculo das variâncias entre e dentro das amostras (MS_B e MS_W) é realizado utilizando-se as eq. A.2 a A.8 apresentadas na Tab. A.1:

Tabela A.1 - Determinação de MS_B e MS_W

$MS_B = \frac{SS_B}{k-1} = \frac{SS_B}{g.l._N}$ (A.2)	$MS_W = \frac{SS_W}{N-k} = \frac{SS_W}{g.l._D}$ (A.6)
$SS_B = \Sigma\ n_i\left(\bar{x} - \bar{\bar{x}}\right)^2$ (A.3)	$SS_W = \Sigma\ \left(n_i - 1\right)s_i^2$ (A.7)
$\bar{x} = \frac{\Sigma\ x}{n}$ $\quad$ $\bar{\bar{x}} = \frac{\Sigma\ x}{N}$ (A.4 e A.5)	$s^2 = \frac{\Sigma\ \left(x - \bar{x}\right)^2}{n-1}$ (A.8)
em que: SS_B = soma dos quadrados entre os grupos; k = número de amostras; $g.l._N$ = graus de liberdade do numerador; n_i = tamanho da amostra i; $\bar{x}$ = média da amostra i; $\bar{\bar{x}}$ = grande média; N = soma dos tamanhos das amostras.	em que: SS_W = soma dos quadrados internos dos grupos; N = soma dos tamanhos das amostras; k = número de amostras; $g.l._D$ = graus de liberdade do denominador; n_i = tamanho da amostra i; s^2 = variância da amostra i; $\bar{x}$ = média da amostra i.

Fonte: Adaptado de Larson e Farber, 2010.

Segundo Larson e Farber (2010), após o cálculo da estatística de teste utilizando as equações mencionadas, compara-se o valor obtido com o valor crítico tabelado (Anexo B), analisando-se:

a) se $F < F_{crítico}$: não rejeito H_0, ou seja, as médias são iguais;

b) se $F > F_{crítico}$: rejeito H_0, ou seja, pelo menos uma das médias é diferente.

APLICAÇÃO DO TESTE COM AMOSTRAS DE DIFERENTES DIÂMETROS

Para aplicação do teste ANOVA unidirecional, tem-se as seguintes hipóteses:

a) H_0: as médias das tensões últimas de aderência das amostras são iguais;
b) H_a: há diferença entre as médias das tensões últimas de aderência das amostras.

a) Amostras utilizando concreto da classe C30

Realizando-se o teste ANOVA unidirecional, tem-se os resultados apresentados nas Tab. A.2 a A.4 para os concretos da classe C30.

Tabela A.2 - Resumo do teste ANOVA – Classe C30 e ϕ= 6,3mm e 8,0mm

DADOS DOS CORPOS DE PROVA – 30 MPa						
CP	**6,3 mm**	**8,0 mm**				
x1	9,35	6,79				
x2	11,84	7,41				
x3	13,18	9,64				
x4	8,31	6,65				
x5	9,57	5,59				
x6	9,04	7,00				
ANOVA: FATOR ÚNICO						
RESUMO						
Grupo	***Contagem***	***Soma***	***Média***	***Variância***		
6,3 mm	6	61,29	10,22	3,52		
8,0 mm	6	43,08	7,18	1,82		
ANOVA						
Fonte da variação	***SS***	***g.l.***	***MS***	***F***	***valor-P***	***F crítico***
Entre grupos	27,63	1	27,63	10,35	0,01	4,96
Dentro dos grupos	26,70	10	2,67			
Total	54,34	11				

Decisão: como F (10,35) > $F_{crítico}$ (4,96), rejeito H_0, ou seja, há significativa diferença entre as médias das tensões últimas de aderência para os corpos de prova que utilizaram concreto da classe C30 e barras de 6,3 mm e 8,0 mm de diâmetro.

Tabela A.3 - Resumo do teste ANOVA – Classe C30 e ϕ= 6,3mm e 10,0mm

DADOS DOS CORPOS DE PROVA – 30 MPa						
CP	**6,3 mm**	**10,0 mm**				
x1	9,35	8,40				
x2	11,84	11,10				
x3	13,18	8,26				
x4	8,31	7,54				
x5	9,57	11,61				
x6	9,04	7,58				
ANOVA: FATOR ÚNICO						
RESUMO						
Grupo	***Contagem***	***Soma***	***Média***	***Variância***		
6,3 mm	6	61,29	10,22	3,52		
10,0 mm	6	54,49	9,08	3,25		
ANOVA						
Fonte da variação	***SS***	***g.l.***	***MS***	***F***	***valor-P***	***F crítico***
Entre grupos	3,85	1	3,85	1,14	0,31	4,96
Dentro dos grupos	33,84	10	3,38			
Total	37,70	11				

Decisão: como F (1,14) < $F_{crítico}$ (4,96), não rejeito H_0, ou seja, as médias das tensões últimas de aderência para os corpos de prova que utilizaram concreto da classe C30 e barras de 6,3 mm e 10,0 mm de diâmetro podem ser iguais.

Tabela A.4 - Resumo do teste ANOVA – Classe C30 e ϕ= 8,0mm e 10,0mm

DADOS DOS CORPOS DE PROVA – 30 MPa						
CP	**8,0 mm**	**10,0 mm**				
x1	6,79	8,40				
x2	7,41	11,10				
x3	9,64	8,26				
x4	6,65	7,54				
x5	5,59	11,61				
x6	7,00	7,58				
ANOVA: FATOR ÚNICO						
RESUMO						
Grupo	***Contagem***	***Soma***	***Média***	***Variância***		
8,0 mm	6	43,08	7,18	1,82		
10,0 mm	6	54,49	9,08	3,25		
ANOVA						
Fonte da variação	***SS***	***g.l.***	***MS***	***F***	***valor-P***	***F crítico***
Entre grupos	10,85	1	10,85	4,28	0,07	4,96
Dentro dos grupos	25,34	10	2,53			
Total	36,18	11				

Decisão: como F (4,28) < $F_{crítico}$ (4,96), não rejeito H_0, ou seja, as médias das tensões últimas de aderência para os corpos de prova que utilizaram concreto da classe C30 e barras de 8,0 mm e 10,0 mm de diâmetro podem ser iguais.

b) Amostras utilizando concreto da classe C60

Realizando-se o teste ANOVA unidirecional, tem-se os resultados apresentados nas Tab. A.5 a A.7 para os concretos da classe C60.

Tabela A.5 - Resumo do teste ANOVA – Classe C60 e ϕ= 6,3mm e 8,0mm

DADOS DOS CORPOS DE PROVA – 60 MPa						
CP	**6,3 mm**	**8,0 mm**				
x1	18,32	17,80				
x2	16,52	17,51				
x3	16,12	17,98				
x4	18,05	17,54				
x5	18,23	18,81				
x6	15,73	17,81				
ANOVA: FATOR ÚNICO						
RESUMO						
Grupo	***Contagem***	***Soma***	***Média***	***Variância***		
6,3 mm	6	102,97	17,16	1,36		
8,0 mm	6	107,45	17,91	0,23		
ANOVA						
Fonte da variação	***SS***	***g.l.***	***MS***	***F***	***valor-P***	***F crítico***
Entre grupos	1,67	1	1,67	2,10	0,18	4,96
Dentro dos grupos	7,95	10	0,80			
Total	9,63	11				

Decisão: como F (2,10) < $F_{crítico}$ (4,96), não rejeito H_0, ou seja, as médias das tensões últimas de aderência para os corpos de prova que utilizaram concreto da classe C60 e barras de 6,3 mm e 8,0 mm de diâmetro podem ser iguais.

Tabela A.6 - Resumo do teste ANOVA – Classe C60 e ϕ= 6,3mm e 10,0mm

DADOS DOS CORPOS DE PROVA – 60 MPa			
CP	**6,3 mm**	**10,0 mm**	
x1	18,32	15,26	
x2	16,52	12,66	
x3	16,12	17,96	
x4	18,05	18,69	
x5	18,23	18,35	
x6	15,73	18,19	

ANOVA: FATOR ÚNICO						
RESUMO						
Grupo	***Contagem***	***Soma***	***Média***	***Variância***		
6,3 mm	6	102,97	17,16	1,36		
10,0 mm	6	101,11	16,85	5,75		
ANOVA						
Fonte da variação	***SS***	***g.l.***	***MS***	***F***	***valor-P***	***F crítico***
Entre grupos	0,29	1	0,29	0,08	0,78	4,96
Dentro dos grupos	35,57	10	3,56			
Total	35,85	11				

Decisão: como F (0,08) < $F_{crítico}$ (4,96), não rejeito H_0, ou seja, as médias das tensões últimas de aderência para os corpos de prova que utilizaram concreto da classe C60 e barras de 6,3 mm e 10,0 mm de diâmetro podem ser iguais.

Tabela A.7 - Resumo do teste ANOVA – Classe C60 e ϕ= 8,0mm e 10,0mm

DADOS DOS CORPOS DE PROVA – 60 MPa						
CP	**8,0 mm**	**10,0 mm**				
x1	17,80	15,26				
x2	17,51	12,66				
x3	17,98	17,96				
x4	17,54	18,69				
x5	18,81	18,35				
x6	17,81	18,19				
ANOVA: FATOR ÚNICO						
RESUMO						
Grupo	***Contagem***	***Soma***	***Média***	***Variância***		
8,0 mm	6	107,45	17,91	0,23		
10,0 mm	6	101,11	16,85	5,75		
ANOVA						
Fonte da variação	***SS***	***g.l.***	***MS***	***F***	***valor-P***	***F crítico***
Entre grupos	3,35	1	3,35	1,12	0,31	4,96
Dentro dos grupos	29,88	10	2,99			
Total	33,23	11				

Decisão: como F (1,12) < $F_{crítico}$ (4,96), não rejeito H_0, ou seja, as médias das tensões últimas de aderência para os corpos de prova que utilizaram concreto da classe C60 e barras de 8,0 mm e 10,0 mm de diâmetro podem ser iguais.

APLICAÇÃO DO TESTE COM AMOSTRAS DE DIFERENTES COMPRIMENTOS DE ANCORAGEM

a) Amostras utilizando as barras de 6,3 mm de diâmetro

Realizando-se o teste ANOVA unidirecional, tem-se os resultados apresentados na Tab. A.8 para os corpos de prova que utilizaram barras de 6,3 mm de diâmetro e diferentes comprimentos de ancoragem.

Tabela A.8 - Resumo do teste ANOVA – Barras de 6,3mm

DADOS DOS CORPOS DE PROVA – 6,3 mm						
CP	**Experimental (10ϕ)**	**França (2010) (5ϕ)**				
x1	9,35	7,87				
x2	11,84	8,97				
x3	13,18	7,33				
x4	8,31	5,14				
x5	9,57	5,35				
x6	9,04	-				
ANOVA: FATOR ÚNICO						
RESUMO						
Grupo	***Contagem***	***Soma***	***Média***	***Variância***		
Experimental (10ϕ)	6	61,29	10,22	3,52		
França (2010) (5ϕ)	5	34,66	6,93	2,73		
ANOVA						
Fonte da variação	***SS***	***g.l.***	***MS***	***F***	***valor-P***	***F crítico***
Entre grupos	29,39	1	29,39	9,28	0,01	5,12
Dentro dos grupos	28,51	9	3,17			
Total	57,91	10				

Decisão: como F (9,28) > $F_{crítico}$ (5,12), rejeito H_0, ou seja, há significativa diferença entre as médias das tensões últimas de aderência utilizando-se barras de 6,3 mm de diâmetro e diferentes comprimentos de ancoragem.

b) Amostras utilizando as barras de 8,0 mm de diâmetro

Realizando-se o teste ANOVA unidirecional, tem-se os resultados apresentados na Tab. A.9 para os corpos de prova que utilizaram barras de 8,0 mm de diâmetro e diferentes comprimentos de ancoragem.

Tabela A.9 - Resumo do teste ANOVA – Barras de 8,0mm

DADOS DOS CORPOS DE PROVA – 8,0 mm						
CP	**Experimental (10ϕ)**	**França (2010) (5ϕ)**				
x1	6,79	6,12				
x2	7,41	5,70				
x3	9,64	5,92				
x4	6,65	7,23				
x5	5,59	7,38				
x6	7,00	-				
ANOVA: FATOR ÚNICO						
RESUMO						
Grupo	***Contagem***	***Soma***	***Média***	***Variância***		
Experimental (10ϕ)	6	43,08	7,18	1,82		
França (2010) (5ϕ)	5	32,35	6,47	0,61		
ANOVA						
Fonte da variação	***SS***	***g.l.***	***MS***	***F***	***valor-P***	***F crítico***
Entre grupos	1,37	1	1,37	1,07	0,33	5,12
Dentro dos grupos	11,52	9	1,28			
Total	12,90	10				

Decisão: como F (1,07) < $F_{crítico}$ (5,12), não rejeito H_0, ou seja, as médias das tensões últimas de aderência utilizando-se barras de 8,0 mm de diâmetro e diferentes comprimentos de ancoragem podem ser iguais.

c) Amostras utilizando as barras de 10,0 mm de diâmetro

Realizando-se o teste ANOVA unidirecional, tem-se os resultados apresentados na Tab. A.10 para os corpos de prova que utilizaram barras de 10,0 mm de diâmetro e diferentes comprimentos de ancoragem:

Tabela A.10 - Resumo do teste ANOVA – Barras de 10,0mm

DADOS DOS CORPOS DE PROVA – 10,0 mm			
CP	**Experimental (10ϕ)**	**França (2010) (5ϕ)**	
x1	8,40	11,40	
x2	11,10	11,09	
x3	8,26	10,11	
x4	7,54	9,65	
x5	11,61	10,51	
x6	7,58	-	

ANOVA: FATOR ÚNICO						
RESUMO						
Grupo	***Contagem***	***Soma***	***Média***	***Variância***		
Experimental (10ϕ)	6	54,49	9,08	3,25		
França (2010) (5ϕ)	5	52,76	10,55	0,50		
ANOVA						
Fonte da variação	***SS***	***g.l.***	***MS***	***F***	***valor-P***	***F crítico***
Entre grupos	5,90	1	5,90	2,91	0,12	5,12
Dentro dos grupos	18,26	9	2,03			
Total	24,15	10				

Decisão: como F (2,91) < $F_{crítico}$ (5,12), não rejeito H_0, ou seja, as médias das tensões últimas de aderência utilizando-se barras de 10,0 mm de diâmetro e diferentes comprimentos de ancoragem podem ser iguais.

APÊNDICE B - Teste de normalidade de *Shapiro-Wilk*

TEORIA

Segundo Portal Action (2017), para realização do teste de normalidade de *Shapiro-Wilk*, primeiramente, deve-se formular as hipóteses:

a) H_0: a amostra é oriunda de uma população normal;
b) H_a: a amostra não é oriunda de uma população normal (PORTAL ACTION, 2017).

Deve-se, então, estabelecer o nível de significância (α), ordenar os dados da amostra e calcular a estatística do teste. Esse teste baseia-se na estatística W, sendo, a mesma, definida pela eq. A.9 (PORTAL ACTION, 2017):

$$W = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_{(i)} - \bar{x}\right)^2} \tag{A.9}$$

em que:
$x_{(i)}$ = valores da amostra ordenados ($x_{(1)}$ é o menor);
$\bar{x}$ = média da amostra;
b é determinado por meio da eq. A.10:

$$b = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n/2} a_{n-i+1} \times \left(x_{(n-i+1)} - x_{(i)}\right), & se\ n\ é\ par \\ \\ \sum_{i=1}^{(n+1)/2} a_{n-i+1} \times \left(x_{(n-i+1)} - x_{(i)}\right), & se\ n\ é\ ímpar \end{cases} \tag{A.10}$$

sendo: a_{n-i+1} constantes geradas por médias, variâncias e covariâncias das estatísticas de ordem de uma amostra que apresenta distribuição normal e tamanho n, obtidas por meio da tabela do Anexo C.

Obtém-se o valor crítico da estatística W de *Shapiro-Wilk* (W_α) utilizando-se a tabela do Anexo C e toma-se a decisão de acordo com os resultados obtidos:

a) se $W < W_\alpha$: rejeite H_0;
b) se $W > W_\alpha$: não rejeite H_0 (PORTAL ACTION, 2017).

APLICAÇÃO DO TESTE

Para aplicação do teste de normalidade de *Shapiro-Wilk*, tem-se as seguintes hipóteses:

a) H_0: a amostra é oriunda de uma população normal;
b) H_a: a amostra não é oriunda de uma população normal.

a) Amostras utilizando concreto da classe C30

- barra de 6,3 mm de diâmetro:

Na Tab. A.11, são apresentados os dados da amostra ordenados:

Tabela A.11 - Dados da amostra – Classe C30 e ϕ= 6,3mm

Posição dos elementos	Tensão última de aderência (MPa)
$x_{(1)}$	8,31
$x_{(2)}$	9,04
$x_{(3)}$	9,35
$x_{(4)}$	9,57
$x_{(5)}$	11,84
$x_{(6)}$	13,18
$\bar{x}$	10,215000

$$\sum_{i=1}^{n}\left(x_{(i)}-\bar{x}\right)^2 = 17{,}605750$$

Utilizando-se a eq. A.10, tem-se o exposto na Tab. A.12:

$$b = \sum_{i=1}^{n/2} a_{n-i+1} \times \left(x_{(n-i+1)} - x_{(i)}\right) \qquad n = 6 \rightarrow \text{par}$$

Tabela A.12 - Cálculo do parâmetro b

i	n-i+1	a_{n-i+1}	$x_{(n-i+1)}$	$x_{(i)}$	$a_{n-i+1}(x_{(n-i+1)} - x_{(i)})$
1	6	0,6431	13,18	8,31	3,131897
2	5	0,2806	11,84	9,04	0,785680
3	4	0,0875	9,57	9,35	0,019250
				b =	3,936827

Por meio da eq. A.9, tem-se, para valor de W:

$$W = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_{(i)} - \bar{x}\right)^2} = \frac{3{,}936827^{\,2}}{17{,}605750} = 0{,}880$$

Comparando-se o valor de W com W_α, considerando um nível de significância de 5% (α = 0,05) e utilizando a tabela do Anexo C, chega-se à seguinte conclusão: como W (0,880) > W_α (0,788), não rejeito H_0. Pode-se afirmar, com um nível de significância de 5%, que a amostra utilizando concreto da classe C30 e barra de 6,3 mm de diâmetro provém de uma população normal.

- barra de 8,0 mm de diâmetro:

Aplicando-se o teste de normalidade de *Shapiro-Wilk*, tem-se o seguinte resultado:

$$W = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_{(i)} - \bar{x}\right)^2} = \frac{2{,}836186^{\,2}}{9{,}098000} = 0{,}884 > W_\alpha\left(0{,}788\right)$$

Pode-se afirmar, com um nível de significância de 5%, que a amostra utilizando concreto da classe C30 e barra de 8,0 mm de diâmetro provém de uma população normal.

- barra de 10,0 mm de diâmetro:

Aplicando-se o teste de normalidade de *Shapiro-Wilk*, tem-se o seguinte resultado:

$$W = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_{(i)} - \bar{x}\right)^2} = \frac{3{,}617379^{\,2}}{16{,}237683} = 0{,}806 > W_\alpha\left(0{,}788\right)$$

Pode-se afirmar, com um nível de significância de 5%, que a amostra utilizando concreto da classe C30 e barra de 10,0 mm de diâmetro provém de uma população normal.

b) Amostras utilizando concreto da classe C60

- barra de 6,3 mm de diâmetro:

Aplicando-se o teste de normalidade de *Shapiro-Wilk*, tem-se o seguinte resultado:

$$W = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_{(i)} - \bar{x}\right)^2} = \frac{2{,}391570^{\,2}}{6{,}818683} = 0{,}839 > W_{\alpha}\left(0{,}788\right)$$

Pode-se afirmar, com um nível de significância de 5%, que a amostra utilizando concreto da classe C60 e barra de 6,3 mm de diâmetro provém de uma população normal.

- barra de 8,0 mm de diâmetro:

Aplicando-se o teste de normalidade de *Shapiro-Wilk*, tem-se o seguinte resultado:

$$W = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_{(i)} - \bar{x}\right)^2} = \frac{0{,}960369^{\,2}}{1{,}133883} = 0{,}813 > W_{\alpha}\left(0{,}788\right)$$

Pode-se afirmar, com um nível de significância de 5%, que a amostra utilizando concreto da classe C60 e barra de 8,0 mm de diâmetro provém de uma população normal.

- barra de 10,0 mm de diâmetro:

Aplicando-se o teste de normalidade de *Shapiro-Wilk*, tem-se o seguinte resultado:

$$W = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_{(i)} - \bar{x}\right)^2} = \frac{4{,}765072^{\,2}}{28{,}747483} = 0{,}790 > W_{\alpha}\left(0{,}788\right)$$

Pode-se afirmar, com um nível de significância de 5%, que a amostra utilizando concreto da classe C60 e barra de 10,0 mm de diâmetro provém de uma população normal.

c) Amostras utilizando um comprimento de ancoragem de 5ϕ (análise utilizando os dados da pesquisa de França, 2010)

- barra de 6,3 mm de diâmetro:

Aplicando-se o teste de normalidade de *Shapiro-Wilk*, tem-se o seguinte resultado:

$$W = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_{(i)} - \bar{x}\right)^2} = \frac{3{,}153494^{\,2}}{10{,}905680} = 0{,}912 > W_{\alpha}\left(0{,}762\right)$$

Pode-se afirmar, com um nível de significância de 5%, que a amostra utilizando barra de 6,3 mm de diâmetro e comprimento de ancoragem de 5ϕ provém de uma população normal.

- barra de 8,0 mm de diâmetro:

Aplicando-se o teste de normalidade de *Shapiro-Wilk*, tem-se o seguinte resultado:

$$W = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_{(i)} - \bar{x}\right)^2} = \frac{1{,}432631^{\,2}}{2{,}423600} = 0{,}847 > W_{\alpha}\left(0{,}762\right)$$

Pode-se afirmar, com um nível de significância de 5%, que a amostra utilizando barra de 8,0 mm de diâmetro e comprimento de ancoragem de 5ϕ provém de uma população normal.

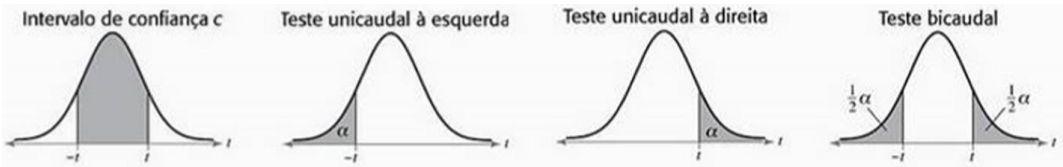
- barra de 10,0 mm de diâmetro:

Aplicando-se o teste de normalidade de *Shapiro-Wilk*, tem-se o seguinte resultado:

$$W = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_{(i)} - \bar{x}\right)^2} = \frac{1{,}399524^{\,2}}{2{,}019280} = 0{,}970 > W_{\alpha}\left(0{,}762\right)$$

Pode-se afirmar, com um nível de significância de 5%, que a amostra utilizando barra de 10,0 mm de diâmetro e comprimento de ancoragem de 5ϕ provém de uma população normal.

ANEXO A - Distribuição *t*



	Nível de confiança, c	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
	Unicaudal, α	0,25	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005
g.l.	Bicaudal, α	0,50	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01
1		1,000	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657
2		0,816	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925
3		0,765	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841
4		0,741	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604
5		0,727	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032
6		0,718	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707
7		0,711	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499
8		0,706	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355
9		0,703	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250
10		0,700	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169
11		0,697	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106
12		0,695	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055
13		0,694	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012
14		0,692	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977
15		0,691	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947
16		0,690	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921
17		0,689	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898
18		0,688	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878
19		0,688	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861
20		0,687	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845
21		0,686	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831
22		0,686	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819
23		0,685	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807
24		0,685	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797
25		0,684	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787
26		0,684	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779
27		0,684	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771
28		0,683	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763
29		0,683	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756
∞		0,674	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576

Fonte: Larson e Farber, 2010.

ANEXO B - Distribuição *F*

$g.l._D$: Graus de liberdade, denominador	$\alpha = 0,05$																			
	$g.l._N$: Graus de liberdade, numerador																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	236,8	238,9	240,5	241,9	243,9	245,9	248,0	249,1	250,1	251,1	252,2	253,3	254,3
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40	19,41	19,43	19,45	19,45	19,46	19,47	19,48	19,49	19,50
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,74	8,70	8,66	8,64	8,62	8,59	8,57	8,55	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,91	5,86	5,80	5,77	5,75	5,72	5,69	5,66	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,68	4,62	4,56	4,53	4,50	4,46	4,43	4,40	4,36
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,00	3,94	3,87	3,84	3,81	3,77	3,74	3,70	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,57	3,51	3,44	3,41	3,38	3,34	3,30	3,27	3,23
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,28	3,22	3,15	3,12	3,08	3,04	3,01	2,97	2,93
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,07	3,01	2,94	2,90	2,86	2,83	2,79	2,75	2,71
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,91	2,85	2,77	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,79	2,72	2,65	2,61	2,57	2,53	2,49	2,45	2,40
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,69	2,62	2,54	2,51	2,47	2,43	2,38	2,34	2,30
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,60	2,53	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,25	2,21
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,53	2,46	2,39	2,35	2,31	2,27	2,22	2,18	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,48	2,40	2,33	2,29	2,25	2,20	2,16	2,11	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,42	2,35	2,28	2,24	2,19	2,15	2,11	2,06	2,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,38	2,31	2,23	2,19	2,15	2,10	2,06	2,01	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,34	2,27	2,19	2,15	2,11	2,06	2,02	1,97	1,92
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,31	2,23	2,16	2,11	2,07	2,03	1,98	1,93	1,88
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,28	2,20	2,12	2,08	2,04	1,99	1,95	1,90	1,84
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,25	2,18	2,10	2,05	2,01	1,96	1,92	1,87	1,81
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	2,23	2,15	2,07	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,78
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,20	2,13	2,05	2,01	1,96	1,91	1,86	1,81	1,76
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,18	2,11	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,79	1,73
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	2,16	2,09	2,01	1,96	1,92	1,87	1,82	1,77	1,71
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,15	2,07	1,99	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,69
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20	2,13	2,06	1,97	1,93	1,88	1,84	1,79	1,73	1,67
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,12	2,04	1,96	1,91	1,87	1,82	1,77	1,71	1,65
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,10	2,03	1,94	1,90	1,85	1,81	1,75	1,70	1,64
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,09	2,01	1,93	1,89	1,84	1,79	1,74	1,68	1,62
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	2,00	1,92	1,84	1,79	1,74	1,69	1,64	1,58	1,51
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	1,92	1,84	1,75	1,70	1,65	1,59	1,53	1,47	1,39
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,17	2,09	2,02	1,96	1,91	1,83	1,75	1,66	1,61	1,55	1,50	1,43	1,35	1,25
∞	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	2,01	1,94	1,88	1,83	1,75	1,67	1,57	1,52	1,46	1,39	1,32	1,22	1,00

Fonte: Larson e Farber, 2010.

ANEXO C - Teste de *Shapiro-Wilk*

Parâmetro a_{n-i+1} do Teste de normalidade de *Shapiro-Wilk*

i\n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0,7071	0,7071	0,6872	0,6646	0,6431	0,6233	0,6062	0,5888	0,5739	0,5601	0,5475	0,5359
2			0,1677	0,2413	0,2806	0,3031	0,3164	0,3244	0,3291	0,3315	0,3325	0,3325
3					0,0875	0,1401	0,1743	0,1976	0,2141	0,2260	0,2347	0,2412
4							0,0561	0,0947	0,1224	0,1429	0,1586	0,1707
5									0,0399	0,0695	0,0922	0,1099
6											0,0303	0,0539

Fonte: Portal Action, 2017.

Valores críticos da estatística W de *Shapiro-Wilk* (W_α)

	Nível de significância								
n	**0,01**	**0,02**	**0,05**	**0,1**	**0,5**	**0,9**	**0,95**	**0,98**	**0,99**
3	0,753	0,756	0,767	0,789	0,959	0,998	0,999	1,000	1,000
4	0,687	0,707	0,748	0,792	0,935	0,987	0,992	0,996	0,997
5	0,686	0,715	0,762	0,806	0,927	0,979	0,986	0,991	0,993
6	0,713	0,743	0,788	0,826	0,927	0,974	0,981	0,986	0,989
7	0,730	0,760	0,803	0,838	0,928	0,972	0,979	0,985	0,988
8	0,749	0,778	0,818	0,851	0,932	0,972	0,978	0,984	0,987
9	0,764	0,791	0,829	0,859	0,935	0,972	0,978	0,984	0,986
10	0,781	0,806	0,842	0,869	0,938	0,972	0,978	0,983	0,986

Fonte: Portal Action, 2017.



PPGEC – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil
Av Amazonas, 7675, Belo Horizonte-MG
www.civil.cefetmg.br/mestrado